

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

Tragverhalten von gußeisernen Stützen  
unter Brandbeanspruchung

A b s c h l u ß b e r i c h t

erstattet von

o. Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

Dipl.-Ing. F. Hoffend

Dezember 1986

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Ministers für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Az. VB1 - 72.02 - Nr. 187/85) durchgeführt.

Postsendungen:  
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig  
Driftungsort und Gerichtstand: Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 381 5431

Fernschreiber: 9 52 698 lbstb d  
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung .....	4
2. Problemstellung .....	4
3. Versuchsprogramm .....	6
4. Untersuchung der verwendeten Baustoffe .....	7
4.1 Untersuchung der Gußproben .....	8
4.1.1 Metalalographische Beurteilung der Gußproben .....	9
4.2 Untersuchung des Betons .....	10
5. Beschreibung der Versuchsstände und des Versuchsaufbaus .....	10
5.1 Brandversuche an gußeisernen Stützen .....	10
5.2 Brandversuche an Gußstummeln .....	11
5.3 Meßprogramm .....	12
5.3.1 Temperaturmessung .....	12
5.3.1.1 Brandraumtemperaturen .....	12
5.3.1.2 Bauteiltemperaturen .....	12
5.3.2 Messung der Verformungen .....	13
6. Ermittlung der Versuchslasten .....	14
7. Aufbringen der Versuchslasten und Versuchsdurchführung .....	14
8. Versuchsbeobachtungen .....	14
9. Stummelversuche unter Raumtemperatur .....	15
10. Auswertung der Versuchsergebnisse .....	16
10.1 Temperaturentwicklung .....	16
10.1.1 Stützenversuche .....	16
10.1.2 Stummelversuche .....	17
10.2 Längenänderungen .....	18
10.2.1 Stützenversuche .....	19
10.2.2 Stummelversuche .....	20
10.3 Seitliche Verformungen (Ausbiegungen) .....	20

	Seite
11. Tragverhalten gußeiserner Hohlprofilstützen .....	21
11.1 Unverfüllte Hohlprofile .....	21
11.2 Betonverfüllte Hohlprofile .....	23
12. Erwärmungsverhalten von Grauguß .....	24
13. Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse .....	26
14. Literatur und Normen .....	29
15. Anlagen (11 Tabellen, 33 Bilder, 27 Fotos)	

## 1. Einleitung

Die Bemessung gußeiserner Hohlstützen aus Grauguß unter Raumtemperatur war bis zu ihrer ersatzlosen Zurückziehung im Dezember 1969 in DIN 1051 /9/ geregelt. Angaben über das Brandverhalten solcher Stützen sind in der entsprechenden Brandschutznorm, der DIN 4102 Teil 4 /18/, nicht enthalten.

Seit einiger Zeit wird im Rahmen der Denkmalpflege und der Aktivierung vorhandener Bausubstanz die Frage nach der brandschutztechnischen Beurteilung von gußeisernen Bauteilen (Träger und Stützen) gestellt. Fehlende Erfahrungen aus Brandversuchen an solchen Bauteilen und nur lückenhafte Informationen über das Materialverhalten von Grauguß unter Brandbeanspruchung führten zwangsläufig zu vorsichtiger, oftmals weit auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung der Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Stützen.

Da Grauguß etwa das gleiche ungünstige Erwärmungsverhalten wie Stahl zeigt, stellt sich gleichzeitig die Frage, mit welchen Maßnahmen die Feuerwiderstandsfähigkeit von gußeisernen Hohlprofilen verbessert werden kann. Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig konnte einige Originalstützen aus Abbruchbeständen bergen. Damit ergab sich die Möglichkeit, Brandversuche an gußeisernen Hohlstützen durchzuführen. Dieses Forschungsvorhaben wurde vom Minister für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen finanziell gefördert.

## 2. Problemstellung

Die Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen im Brandfall erfolgt in der Regel nach Prüfungen entsprechend DIN 4102 Teil 2 /18/. In dieser Norm werden brandschutztechnische Begriffe, Anforderungen und Prüfungen für Bauteile festgelegt. Tragende Bauteile müssen danach bei praxisgerechter Ausführung und praxisgerechtem Einbau während der geforderten Feuerwiderstandsdauer der statisch zulässigen Belastung widerstehen. Ist eine Prüfung unter Gebrauchslast nicht möglich, darf z.B. bei Stahlstützen an keiner Meßstelle die Bauteiltemperatur den Wert von 500 °C überschreiten.

Eine Prüfung nach DIN 4102 Teil 2 /18/ ist bei gußeisernen Hohlensäulen nicht möglich, da es sich bei den zur Beurteilung anstehenden Stützen in der Regel um vorhandene alte Bausubstanz und nicht um eine neue Baumaßnahme handelt. Das Temperaturkriterium von 500 °C bei Stahlstützen kann für gußeiserne Hohlensäulen aus zwei Gründen nicht übernommen werden:

- Das Materialverhalten von Grauguß unterscheidet sich bei Raumtemperatur ganz wesentlich vom Materialverhalten von Baustahl. Daher sind auch bei erhöhter Temperatur wesentliche Unterschiede im Materialverhalten von Grauguß und Baustahl zu erwarten.
- Die zulässige Gebrauchslast von Stahlstützen wird in DIN 18 800 Teil 1 /11/ und DIN 4114 /10/ geregelt. Die zulässige Gebrauchslast von gußeisernen Hohlensäulen aus Grauguß wurde bis Dezember 1969 in DIN 1051 /9/ geregelt. Die Unterschiede sind so gravierend, daß schon daher die kritische Temperatur von 500 °C für Stahlbauteile nicht auf gußeiserne Bauteile übertragen werden kann.

Für gußeiserne Hohlensäulen sind deshalb gesicherte brandschutztechnische Beurteilungskriterien erforderlich, die eine Prüfung nach DIN 4102 Teil 2 /18/ überflüssig machen.

Wegen der relativ schnellen Erwärmung ungeschützter gußeiserner Bauteile stellt sich die Frage nach geeigneten Maßnahmen zur Verbesserung der Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Hohlensäulen. Da aus architektonischen Gründen in der Regel gußeiserne Hohlensäulen sichtbar bleiben sollen, Bekleidungen verschiedenster Ausführung also nicht in Frage kommen, bleiben nur noch zwei Möglichkeiten, die Feuerwiderstandsdauer von gußeisernen Hohlensäulen zu verbessern:

- Verbesserung des Erwärmungs- und Tragverhaltens durch Verfüllung mit Beton,
- Verbesserung des Erwärmungsverhaltens durch Aufbringung eines dämmschichtbildenden Anstrichs.

### 3. Versuchsprogramm

Das ursprüngliche Konzept war, aus fünf Stützenversuchen mit unterschiedlicher Schlankheit und unterschiedlicher Belastung möglichst viele Informationen über das Trag- und Verformungsverhalten brandbeanspruchter gußeiserner Hohlstützen zu erhalten. Aus den Ergebnissen einer größeren Zahl von Warmkriechversuchen an Kleinproben sollten temperaturabhängige Spannungs/Dehnungs-Beziehungen gewonnen werden, die in bereits vorhandene Rechenprogramme eingebaut werden sollten. Anhand von Vergleichsrechnungen sollte gezeigt werden, daß für praxisrelevante Fälle eine gesicherte rechnerische Prognose der Versagenstemperatur von gußeisernen Hohlprofilen möglich ist.

Nach eingehender Überprüfung des geretteten Abbruchmaterials zeigte sich, daß das vorgenannte Konzept nicht durchzuführen war. Nach dem Absägen der angeschlagenen Endbereiche blieben noch zwei Stützen mit einer Länge von 3,240 m und eine Stütze mit einer Länge von 4,120 m übrig.

Alle weiteren Reststücke hatten eine Länge von  $\leq 2,0$  m. Im Stützenbrandhaus des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz sind normalerweise Einbaulängen von 3,70 m bis 5,70 m realisierbar. Mit Hilfe einer Zusatzkonstruktion konnte die Mindestlänge um 0,50 m auf 3,200 m reduziert werden. Die reduzierte Einbaulänge gestattete jedoch nur eine feste, drehbehinderte Lagerung der Stützen mit gleichzeitiger zentrischer Lasteinleitung (Euler-Fall IV). Die im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig vorliegenden umfangreichen Ergebnisse aus Brandversuchen an Rahmensystemen sowie an Stahl-, Stahlbeton- und Verbundstützen mit den unterschiedlichsten Randbedingungen zeigen, daß die im Hochbau üblichen Stützen-/Träger-Verbindungen, mit Ausnahme der Punkt- bzw. Linien-Lagerung, im Brandfall als steife, drehbehinderte Lagerung der Stützen angesehen werden können. Mit der beschriebenen Lagerung (Euler-Fall IV) wird daher die Forderung von DIN 4102 Teil 2 /18/, einen praxismgerechten Einbau zu realisieren, erfüllt.

Nach DIN 1051 /9/ ist für die Ermittlung der zulässigen Gebrauchslast von "unverrückbar" eingebauten gußeisernen Hohlstützen die Stützenlänge als Knicklänge (Euler-Fall II) anzunehmen. Zudem ist die zulässige Schlankheit auf  $\lambda \leq 100$  begrenzt. Daraus folgt für den Brandlastfall

eine mit der Schlankheit zunehmende Tragreserve. Die Auslastung beträgt bei der maximal zulässigen Schlankheit von  $\lambda = 100$  (Euler-Fall II), im Brandfall also  $\lambda = 50$  (Euler-Fall IV), nur noch 25,5 % der zulässigen Last nach Euler-Fall IV (siehe Tabelle 6, Spalte 5). Bezogen auf die rechnerische Quetschlast  $N_Q = \sigma_{dB} \cdot A$ , sind gußeiserne Hohlssäulen nach dem beschriebenen Bemessungskonzept nur mit 15 % der Quetschlast beansprucht (siehe Tabelle 7).

Bei den genannten geometrischen und statischen Randbedingungen ist für brandbeanspruchte gußeiserne Hohlssäulen ein Versagen erst nach Einsetzen größerer plastischer Verformungen (Stauchungen) zu erwarten. Die Ermittlung der temperaturabhängigen Quetschlast ist daher von besonderem Interesse. Anstelle der geplanten fünf Stützenversuche wurden daher neben drei Stützenversuchen an Hohlssäulen sieben Versuche an Gußstummeln mit der Länge von 0,90 m zur Ermittlung der temperaturabhängigen Quetschlast sowie zwei "Kaltversuche" an Gußstummeln durchgeführt.

Zur Überprüfung des günstigen Einflusses der Betonverfüllung wurden eine Hohlsäule sowie vier Gußstummel mit einem Beton der Festigkeitsklasse B 35 verfüllt und mit einer Rüttelflasche verdichtet. Sämtliche ausbetonierten Profile wurden mit Öffnungen (Löchern) entsprechend den Vorgaben von DIN 4102 Teil 4 /18/ versehen, um ein zu hohes Ansteigen des Dampfdruckes zu verhindern.

Aus den verbliebenen Bruchstücken wurden Zug- und Druckproben gewonnen, welche zur Ermittlung der wichtigsten Materialkennwerte bei Raumtemperatur verwendet wurden.

#### 4. Untersuchung der verwendeten Baustoffe

Zur Einordnung der verwendeten Baustoffe in die entsprechenden Güteklassen und zur besseren Interpretation der Brandversuche wurden alle erforderlichen Materialkennwerte für Guß und Beton bei Raumtemperatur ermittelt. Sämtliche Gußuntersuchungen an Kleinproben wurden im Institut für Schweißtechnik und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Die Betonfestigkeitswerte wurden im eigenen Institut ermittelt.

#### 4.1 Untersuchungen an Gußproben

Das geborgene Material bestand aus sieben gußeisernen Hohlprofilen mit unterschiedlichem Durchmesser. Aus vier Hohlprofilen wurden je zwei Gußstummel ausgesägt, von denen jeweils ein Gußstummel mit Beton verfüllt wurde. Somit lagen sieben Versuchskörper mit vermutlich unterschiedlichen Festigkeiten vor.

Zur metallographischen Beurteilung wurden Mikroschliffbilder erstellt (siehe Abschnitt 4.1.1). Da es sich offensichtlich um Guß mit Lamellengraphit, also Grauguß, handelte, wurden die Materialuntersuchungen gemäß DIN 1691 /12/ vorgenommen.

Für die Einordnung in die Festigkeitsklassen GG-10 bis GG-35 war danach die Zugfestigkeit  $R_m$  an Zugproben gemäß DIN 50 109 /15/ zu ermitteln. Zusätzlich wurde der E-Modul (Zug), die Elastizitätsgrenzen  $R_{p0,1}$  und  $R_{p0,2}$ , die Bruchdehnung  $\epsilon_u$  sowie die Zugfestigkeit  $R_m$  nach DIN 50 145 /16/ an Proben gemäß DIN 50 125 /17/ ermittelt. Die an zwei unterschiedlichen Proben ermittelten Zugfestigkeitswerte weichen nicht sonderlich voneinander ab. Insgesamt liegen die Ergebnisse aller Untersuchungen im Bereich  $123 \text{ N/mm}^2 \leq R_m \leq 159 \text{ N/mm}^2$  (siehe Tabelle 1). Nach DIN 1691 /12/ liegen für die Festigkeitsklasse GG-15 die einzuhaltenden Werte bei getrennt gegossenen Probestücken unabhängig von der Wanddicke bei  $150 \text{ N/mm}^2$  bis  $250 \text{ N/mm}^2$  und bei angegossenen Probestücken bei den hier vorliegenden Wanddicken von  $< 40 \text{ mm}$  bei  $120 \text{ N/mm}^2$ . Da die Zugfestigkeitswerte an aus Gußstücken ausgearbeiteten Proben ermittelt wurden, sind die Versuchsergebnisse zutreffender mit den Erwartungswerten aus Tafel 1 von DIN 1691 /13/ zu vergleichen, die für die vorliegenden Wanddicken mit  $110 \text{ N/mm}^2$  bis  $130 \text{ N/mm}^2$  angegeben sind. Die untersuchten gußeisernen Hohlprofile können daher einheitlich als Grauguß der Güteklasse GG-15 gemäß DIN 1691 /12/ eingeordnet werden.

Im Gegensatz zu Baustahl unterscheiden sich bei Grauguß die Materialkennwerte aus Zugbeanspruchung deutlich von den Kennwerten aus Druckbeanspruchung. Zur Beurteilung der Stützen- und Stummelversuche mit ausschließlicher Druckbeanspruchung wurden daher auch die Materialkennwerte E-Modul, Fließgrenze  $\sigma_{d0,2}$ , Bruchstauchung  $\epsilon_B$  und Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  ermittelt.



An zwei Prüfkörpern wurden nach dem Brandversuch Druckproben entnommen und die entsprechenden Materialkennwerte überprüft (Restfestigkeit). Die gefundenen Werte entsprachen in etwa den Ergebnissen an Proben ohne vorherige Brandbeanspruchung.

Sämtliche Versuchsergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

#### 4.1.1 Metallographische Beurteilung der Gußproben

Zur metallographischen Beurteilung des Probenmaterials wurden von den sieben Gußhohlprofilen zehn Mikroschliffbilder (Foto 17 bis Foto 27) angefertigt. Die Beurteilung (in Kurzform) lautet:

- Probe 1: Ferritisch-perlitisches Gußeisen mit Phosphitanteil. Zum Rand hin höherer Ferritanteil sowie nesterförmige Graphitlamellenausbildung (Foto 17, 24, 25).
- Probe 2: Ferritisch-perlitisches Gußeisen mit hohem Phosphitanteil. Zum Rand hin höherer Ferritanteil sowie nesterförmige Graphitlamellenanordnung. Spangiose vom inneren Rand ausgehend (Foto 18).
- Probe 3: Ferritisch-perlitisches Gußeisen mit hohem Phosphitanteil. Zum Rand hin etwas höherer Ferritanteil sowie nesterförmige Graphitlamellenanordnung. Geringfügige Spangiose vom inneren Rand ausgehend (Foto 19).
- Probe 4: Perlitisches Gußeisen mit hohem Phosphitanteil. Äußerer und innerer Rand mit geringen Ferritanteilen sowie nesterförmige Graphitlamellenanordnung (Foto 20).
- Probe 5: Perlitisches Gußeisen mit hohem Phosphitanteil. Äußerer und innerer Rand mit geringen Ferritanteilen sowie nesterförmige Graphitlamellenanordnung. Spangiose vom äußeren Rand ausgehend (Foto 21/26, 27).
- Probe 6: Ferritisch-perlitisches Gußeisen mit hohem Phosphitanteil. Äußerer und innerer Rand mit hohen Ferritanteilen sowie ne-

sterförmige Graphitlamellenanordnung. Kleinere Gußlunker vorhanden (Foto 22).

Probe 7: Perlitisches Gußeisen mit hohem Phosphitanteil. An den Rändern nur sehr geringer (vereinzelter) Ferritanteil. Graphitlamellenanordnung am Rand nesterförmig (Foto 23).

Bei dem vorliegenden Gußeisen handelt es sich eindeutig um Grauguß.

#### 4.2 Untersuchung des Betons

Der Beton wurde von einer Transportbetonfirma angeliefert und von eigenen Fachkräften verarbeitet. Die Werksangaben zur Betonrezeptur sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Gußstütze 3 B und die vier Gußstummel wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit Beton verfüllt. Aus beiden Mischungen wurden je neun Würfel mit 15 cm Kantenlänge hergestellt. Je drei Würfel wurden gemäß DIN 1048 /19/ sieben Tage unter Wasser und danach unter Normklimabedingungen (20 °C, 65 % Luftfeuchtigkeit) gelagert. Weitere drei Würfel je Mischung wurden bis zum Prüfzeitpunkt (Brandversuch) neben den Versuchshauteilen gelagert. Die restlichen zwei mal drei Würfel wurden nach drei Tagen allseitig mit Paraffin abgedichtet und ebenfalls neben den Stützen und Stummeln gelagert. Sämtliche Stützen und Stummel standen bis zum Versuchszeitpunkt senkrecht in einer geschützten Halle. Der Füllbeton in den Gußrohren konnte daher allenfalls nach oben austrocknen. Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen nach 28 Tagen und zum Zeitpunkt der Brandversuche sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

### 5. Beschreibung der Versuchsstände und des Versuchsaufbaus

#### 5.1 Brandversuche an gußeisernen Stützen

Die Brandversuche wurden im Stützenbrandhaus des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau dieses Brandhauses. Der Brandraum hat eine Grundfläche von 3,60 m x 3,60 m und war bei den Versuchen 4,10 m bzw. 3,60 m hoch. Die Entwicklung der Brand-

raumtemperaturen entsprach bei allen Versuchen der Einheits-Temperaturzeit-Kurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2 /18/. Der Brandraum wurde durch sechs Ölbrenner, die im Brandraumboden angeordnet sind, beflammt. Die Flammenachsen verliefen parallel zu der Versuchskörperachse in einem Abstand von ungefähr 1,30 m bzw. 1,85 m. Während der Brandversuche herrschte im Brandraum ein Überdruck von etwa 8 Pa.

An den gußeisernen Hohlstützen waren an beiden Enden 3 cm dicke Kopfplatten aus St 52 angebracht. Beide Kopfplatten wurden mit direktem Kontakt zur Kopfplatte des Oberhauptes bzw. mit der Kopfplatte des vertikal geführten unteren Zwischenstückes eingebaut. Die Versuchslast wurde über zwei last- und weggesteuerte Pressen, die unter dem Zwischenstück angeordnet waren, aufgebracht. Die Wegsteuerung der beiden Pressen verhinderte das seitliche Ausweichen bzw. die Schiefstellung des Zwischenstückes in der Nord/Süd-Ebene. In der Ost/West-Richtung wurde das Zwischenstück mit Hilfe von Rollenlagern geführt. Für die nur 3,224 m langen Versuchskörper 2 und 3 wurde das Zwischenstück um 0,50 m in den Brandraum verlängert und mit Gasbetonsteinen vor zu starker Erwärmung geschützt. Mit dieser Konstruktion wurde bei allen Versuchen eine nahezu vollständige Beflammung der Versuchskörper erreicht.

## 5.2 Brandversuche an Gußstützen

Die Brandversuche wurden im Kleinbrandhaus des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Bild 2 zeigt den Grundriß des Brandhauses mit dem nochmals in Foto 16 gezeigten Belastungsgerüst. Der Brandraum hat eine Grundfläche von 1,0 m x 1,5 m und war in ungefähr 1,4 m Höhe mit Gasbetonplatten abgedeckt. Das Belastungsgerüst stand im Brandraum und war im unteren Bereich mit Gasbetonsteinen vor Erwärmung geschützt. Die beiden Spindeln sowie die Unterseite der Lasttraverse waren mit Wärmedämmmaterial (VERMICULITE) geschützt. Die höher liegenden Teile des Belastungsgerüsts waren durch die Brandraumabdeckung vom Brandraum getrennt. Die Brandraumtemperaturen wurden entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 /18/ gesteigert. Der Brandraum wurde durch zwei an der Vorderseite (Nordseite) etwas unterhalb der halben Stummelhöhe angeordneten Ölbrenner beflammt. Die beiden Flammenachsen verliefen horizontal in einem seitlichen Abstand von 0,60 m.

Die Flammenspitzen reichten bis fast zur Brandraummitte. Während der Brandversuche herrschte im Brandraum ein geringer Überdruck. Die 0,90 m langen Gußstummel wurden an beiden Enden mit 2 cm dicken Kopfplatten aus St 52 versehen und senkrecht in das Belastungsgerüst gestellt. Die Versuchslast wurde von oben über zwei Pressen aufgebracht.

### 5.3 Meßprogramm

Sämtliche Temperaturmeßwerte und Längenänderungen der Versuchskörper wurden von einer elektronischen Vielstellenmeßanlage (3530 Orion Data Logging System der Firma Schlumberger) in Abständen von 30 Sekunden aufgenommen. Die Versuchslasten wurden sowohl über die Vielstellenmeßanlage als auch über Siemens-Linien-Schreiber kontrolliert. Bei den drei Brandversuchen an Gußstützen wurden zusätzlich die Ausbiegungen in den Richtungen Nord/Süd und Ost/West (siehe Bilder 25 bis 27) optisch mit Hilfe von Kathetometern gemessen.

#### 5.3.1 Temperaturmessungen

##### 5.3.1.1 Brandraumtemperaturen

Zur Steuerung der Brandraumtemperaturen dienten übliche NiCr-Ni-Mantelthermoelemente, die 100 mm vor der Bauteiloberfläche angeordnet waren. Bei den Brandversuchen an Gußstützen waren entsprechend DIN 4102 Teil 2 /18/ in drei Meßebenen je zwei Thermoelemente angeordnet. Die Brandraumtemperaturen bei den Versuchen an Gußstummeln wurden anhand von vier in halber Stummelhöhe angebrachten Thermoelementen gesteuert. Die genaue Lage der Brandraummeßstellen ist in den Bildern 3 bis 6 dargestellt.

##### 5.3.1.2 Bauteiltemperaturen

An den drei Gußstützen wurden in mehreren Ebenen ausschließlich Oberflächentemperaturen gemessen. Bei den Gußstummeln wurden zusätzlich an einigen Stellen die Temperaturen an der Innenwandung der Hohlprofile gemessen. Zur Messung der Oberflächentemperaturen wurden ebenfalls

NiCr-Ni-Mantelthermoelemente verwendet. Das Ende eines jeden Thermoelements wurde in eine etwa 1 mm tiefe und 2 mm breite ausgearbeitete Vertiefung gelegt und mit einem quer über das Element geführten Draht lagegenau gehalten. Der Draht wurde mit einem Punktschweißgerät an der Gußoberfläche angeschweißt. Das Elementende einschließlich Draht wurde anschließend mit PLAKITE, einem Spezialkleber zum Anbringen von Wärmedämmmaterial, gegenüber direkter Wärmeeinwirkung abgeschirmt.

Die Gußtemperaturen an der Innenwandung wurden ebenfalls mit NiCr-Ni-Thermoelementen gemessen. Bei dem Versuchskörper 5 konnten die beiden Drähte des jeweiligen Thermoelements durch Punktschweißung befestigt werden. Bei den anderen Versuchskörpern war der Innendurchmesser so klein, daß kein Punktschweißgerät eingeführt werden konnte. Deshalb wurden die beiden Meßdrähte eines Thermoelements auf ein Kupferplättchen gelötet. Die Kupferplättchen wurden mit einem Wasserglas-Talkum-Gemisch auf die gereinigte Gußinnenwandung geklebt.

Zur Messung der Betontemperaturen wurden die Thermodrähte mit einer Meßperle versehen und durch Meßleitern in ihrer Lage fixiert. Auch hier wurden NiCr-Ni-Thermoelemente verwendet. Die Thermoelemente wurden innerhalb der Versuchskörper gebündelt aus dem Brandraum geführt.

Zusätzlich wurden bei den Brandversuchen an den Gußstummeln - zur Kontrolle - die Temperaturen der beiden Spindeln des Belastungsgerüsts aufgezeichnet. Die Lage und die Numerierung der Thermoelemente sind in den Bildern 3 bis 6 festgehalten.

### 5.3.2 Messung der Verformungen

Im Stützenbrandhaus war es möglich, die bei der Aufbringung der Versuchslast auftretenden Verformungen des Belastungsgerüsts zu messen und damit die tatsächliche Stauchung der Versuchskörper infolge der Versuchslast zu bestimmen. Deshalb sind in Bild 20 die Längenänderungen, bezogen auf den unbelasteten Versuchskörper, dargestellt. Dagegen enthalten die Bilder 21 bis 24 (Gußstummelversuche) nur die Längenänderungen, bezogen auf den belasteten Versuchskörper.

## 6. Ermittlung der Versuchslasten

Die aufgebrachten Versuchslasten orientieren sich an den zulässigen Gebrauchslasten gemäß DIN 1051 /9/. Die Stützenlast ergibt sich danach aus der reduzierten, schlankheitsabhängigen Spannung, multipliziert mit der Querschnittsfläche ( $N_{zul} = \sigma_{d,zul} \cdot A$ ). Die Querschnittswerte sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengestellt. Bei den Stummelversuchen wurden ungefähr die 0,85-, 1,00-, 1,45- bzw. 1,60-fache Gebrauchslast aufgebracht. Die Stützenversuche wurden einheitlich mit der zulässigen Gebrauchslast gemäß DIN 1051 /9/ belastet. Die ausbetonierten Versuchskörper wurden als Parallelversuche grundsätzlich mit der gleichen Last wie die entsprechenden Versuchskörper ohne Betonfüllung geprüft. Tabelle 7 enthält sämtliche statischen und brandspezifischen Angaben.

## 7. Aufbringen der Versuchslasten und Versuchsdurchführung

Die Versuchslasten wurden bei sämtlichen Versuchen in fünf etwa gleichgroßen Laststufen aufgebracht. Danach wurde in drei Laststufen entlastet und wieder in fünf Laststufen belastet. Dabei wurden sämtliche Verformungswerte abgelesen und auf ihre Plausibilität überprüft. Die aufgebrachten Versuchslasten wurden während der Brandversuche konstant gehalten. Die Versuche wurden in der Regel abgebrochen, wenn die Verformungen der Versuchskörper so schnell anwuchsen, daß die Pressenkräfte nicht mehr gehalten werden konnten. Die Brandraumtemperaturen wurden bei allen Versuchen entsprechend der Einheits-Temperaturzeit-Kurve (siehe Abschnitt 5.1) von Hand gesteuert.

## 8. Versuchsbeobachtungen

In beiden Brandhäusern konnten durch mehrere Sehschlitze sowohl die Flammenlängen als auch das Verhalten der Versuchskörper ständig beobachtet werden.

Sämtliche Gußstummel beulten in der Endphase der Brandversuche etwas unterhalb der halben Stummellänge, in Höhe der Flammenachsen langsam ringförmig aus (Wulstbildung). Bei den Versuchen 4 und 4B (Foto 7 und 8) reichte der Pressenweg nicht aus, die Versuchskörper voll zu zer-

drücken. Der steile Anstieg der Stauchungen (Bild 21) zeigt jedoch, daß der Versagenszeitpunkt erreicht war. Bei allen anderen Gußstummeln stellten sich nach Ausbildung eines deutlichen ringförmigen Wulstes vertikale Risse im Wulstbereich ein. Dies ist bei den Versuchskörpern 5B und 6B (Foto 10 und 12) besonders deutlich zu erkennen. Unmittelbar darauf zerbrachen die Gußstummel.

Bei den Gußstützen nahmen die Ausbiegungen gegen Versuchsende deutlich zu. Auch hier deuteten sich in der Endphase auf der stärker gedrückten Seite wulstartige Querschnittsveränderungen an. Nach dem Ausbau der erkalteten Hohlprofile waren an den Gußstützen keinerlei Rißbildungen oder sonstige Beschädigungen erkennbar.

#### 9. Stummelversuche bei Raumtemperatur

Um einen Bezug zwischen der temperaturabhängigen Quetschlast, der Quetschlast unter Raumtemperatur und der rechnerischen Quetschlast zu erhalten, wurde der Versuchskörper 7 (Gußstummel ohne Beton) unter Raumtemperatur abgedrückt. Bei der Vorbereitung stellte sich heraus, daß insbesondere an einem Ende des Versuchskörpers größere Lunkerstellen vorlagen. Deshalb wurde der Gußstummel zersägt und daraus zwei Versuchskörper mit der Länge von 60 cm bzw. 25 cm erstellt. Auch hier waren in den Stirnflächen der beiden Versuchskörper noch Lunkerstellen erkennbar. Beim Abdrücken platzten in beiden Fällen Querschnittsteile aus den Lunkerbereichen direkt unterhalb der Kopfplatten heraus (Foto 13 und 14). Die dabei ermittelten Quetschlasten lagen bei 44 % bzw. 52 % der rechnerischen Quetschlast ( $\sigma_{dB} \cdot A$ ); sie lagen damit jedoch um etwa das Dreifache bzw. 3,5fache über der zulässigen Querschnittsbeanspruchung (zul  $\sigma \cdot A$ ) nach DIN 1051 /9/. Die Ergebnisse der beiden Stummelversuche unter Raumtemperatur sind in Tabelle 7 zusammengefaßt.

## 10. Auswertung der Versuchsergebnisse

Die mit der in Abschnitt 5.3 angeführten Vielstellenmeßanlage aufgenommenen Meßwerte wurden auf die institutseigene Rechenanlage, eine PRIME 550-II, überspielt und dort ausgewertet (Plotterbilder 10 bis 24). Die Bilder 7 bis 9 wurden aus den Aufzeichnungen eines Siemens-Linien-Schreibers übertragen, während die Bilder 25 bis 27 anhand der Versuchsprotokolle erstellt wurden.

### 10.1 Temperaturentwicklung

Die thermodynamischen Bedingungen (Geometrie der Brandräume, Brenneranordnung, Abzugsverhältnisse usw.) sind in den beiden Brandhäusern nicht identisch. So lagen im Kleinbrandhaus die Flammenspitzen in unmittelbarer Nähe der Gußstummel. Die gemessene Erwärmung (Temperatur-Zeit-Verhalten) der Gußstummel hat daher im Gegensatz zu den Gußstützen nur eine beschränkte Aussagekraft. Die gemessenen Betontemperaturen wie auch die Oberflächentemperaturen sind jedoch infolge der bei Brandversuchen an unbedeckten Stahl- bzw. Stahlverbundbauteilen erprobten Präparierung der Meßstellen vertrauenswürdig. Insbesondere können die Versagenstemperaturen der Stummel- und Stützenversuche miteinander verglichen werden.

#### 10.1.1 Stützenversuche

Die Bilder 7 bis 9 zeigen, daß bei allen Stützenversuchen die Brandraumtemperaturen nur wenig vom Sollwert der ETK abwichen. Bei den drei Stützenversuchen lag also die gleiche Brandbeanspruchung vor. Die Oberflächentemperaturen in halber Stützenhöhe (Meßstellen 6 bis 9) weisen ebenfalls nur eine geringe Streuung von  $\Delta T \leq 20^\circ \text{C}$  auf. Auch die in den Viertelpunkten gemessenen Temperaturen (Bilder 3, 4, 10, 11, 12) weichen nur unwesentlich von den vorgenannten Oberflächentemperaturen ab. Lediglich die Meßpunkte 1 und 2 weisen niedrigere Temperaturen aus. Dies ist eindeutig auf die Brenneranordnung zurückzuführen. Bei Versuch 1 entsprach die Stützenlänge von 4,12 m ungefähr der Brandraumhöhe von 4,20 m. Die beiden Meßstellen lagen damit nur 300 mm über dem Brandraumboden und somit im Flammenschatten der im Boden angebrachten



Brenner. Der Fußpunkt der Versuchsstützen 2 und 3B (Prüflänge 3,24 m) befand sich etwa 500 mm über dem Brandraumboden. Die Meßstellen 1 und 2 lagen hier also 800 mm über der Brennermündung. Die gemessenen Temperaturen (Meßstelle 1 und 2) lagen bei den Versuchen 2 und 3B daher auch entsprechend näher bei den in den Viertelpunkten gemessenen Werten.

Die Betontemperaturen der Stütze 3B zeigen den für ausbetonierte Hohlprofile charakteristischen Verlauf (Bilder 4 und 12). Im äußeren Bereich, etwa 2 cm vom Gußprofil, steigen die Temperaturen kontinuierlich an. Im Kern des Betonquerschnitts kommt es dagegen infolge der Verdampfung der Betoneigenfeuchte zu einem vorübergehenden Haltepunkt. Da der Dampfaustritt durch das umhüllende Profil trotz der Öffnungen (Löcher) stark behindert wird und der Beton weiter erwärmt wird, liegt der Haltepunkt mit Betontemperaturen über 150 °C deutlich über der Wasserdampf Temperatur von ungefähr 100 °C.

Im Betonquerschnitt bildet sich stets ein ausgeprägter Temperaturgradient aus, d.h. die Temperaturen des äußeren Betonbereichs liegen beträchtlich über den Temperaturen des inneren Betonkerns. Da ein Teil der vom Gußprofil aufgenommenen Wärmemenge an den Beton abgeführt wird, verzögert sich die Erwärmung des Gußprofils. Sie beträgt bei einer Gußtemperatur von 650 - 700 °C etwa 7,5 min (Bild 28).

Für die Beurteilung der Gußstützen werden die gemittelten Oberflächentemperaturen in halber Stützhöhe herangezogen.

#### 10.1.2 Stummelversuche

Die Einhaltung der Sollwerte der ETK war bei den Stummelversuchen infolge des geringen Abstands der Flammenspitzen von den Temperaturmeßstellen recht schwierig.

Immerhin lagen die Brandraumtemperaturen ab etwa der 7. Minute innerhalb des zulässigen Streubereichs nach DIN 4102 /18/ (Bilder 13 bis 19).

Die an der Innenwandung der Gußstummel angehefteten Thermoelemente (Versuche 4, 5 und 6) dienten zur Kontrolle und Bestätigung der an der

Außenwandung gemessenen Gußtemperaturen.

Bei Versuch 5 waren die Innenelemente angepunktet (siehe Abschn. 5.3.1.2). Die Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenwandung liegen bei einer Wandstärke von 17 mm bis 32 mm zwischen 10 °C und 50 °C, im Mittel also bei  $T = 30$  °C. Diese Differenzen werden durch die Ergebnisse der angestellten Vergleichsrechnungen bestätigt. Es kann also davon ausgegangen werden, daß die Oberflächentemperaturen zutreffend gemessen wurden.

Bei den Versuchen 4 und 6 waren die Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenwandung mit mittleren Werten von  $T = 100$  °C bzw. 50 °C wesentlich größer. Dies ist vermutlich auf eine zu dicke Klebeschicht zurückzuführen (siehe Abschn. 5.3.1.2).

Die Betontemperaturen zeigen den gleichen charakteristischen Verlauf wie die Betontemperaturen der Gußstütze 3B (siehe Abschn. 10.1.1).

Die Meßstellen 15/16 bzw. 16/17 (Bilder 13 bis 19) zeigen, daß die Belastungsspindeln der Brandversuche ausreichend geschützt waren.

Das Erwärmungsverhalten der Stummelversuche ist uneinheitlich. So wurden bei Versuch 6B trotz Betonfüllung höhere Gußtemperaturen als bei dem unverfüllten Parallelversuch 6 gemessen. Dies ist sicherlich auf die vorgenannten Schwierigkeiten bei der exakten Einhaltung der ETK zurückzuführen.

Für die Bestimmung der temperaturabhängigen Quetschlasten werden, wie bei den Gußstützen, die gemittelten Oberflächentemperaturen in halber Bauteilhöhe herangezogen.

## 10.2 Längenänderungen

Die gemessenen Längenänderungen setzen sich aus der thermischen Verlängerung sowie der Verkürzung (Stauchung) infolge temperaturabhängiger Materialentfestigung zusammen. Bei den Stützenversuchen kommt eine weitere, allerdings geringe Verkürzung aus der Stützenausbiegung (Sehnenverkürzung) hinzu. Die Stauchung wird zu Anfang vorwiegend von dem

Abfall des E-Moduls (elastische Stauchung) gegen Versuchsende zunehmend durch die plastischen Verformungen bestimmt.

Die Temperaturmessung hat gezeigt, daß insbesondere bei den Gußstummeln keine gleichmäßige Aufheizung über die Länge der Versuchskörper vorliegt. Da zudem keine zuverlässigen Angaben über das Spannungs/Dehnungs-Verhalten von Grauguß unter Druckbeanspruchung bei höheren Temperaturen vorliegen, ist eine rechnerische Aufteilung der Verformungsanteile aus Temperatur und Last nicht möglich. Jedoch ermöglicht der Verlauf der gemessenen Längenänderungen einige Rückschlüsse auf das Trag- und Verformungsverhalten von Grauguß unter Brandbeanspruchung. Außerdem ermöglichen die gemessenen Längenänderungen eine weitere Kontrolle der gemessenen Gußtemperaturen.

#### 10.2.1 Stützenversuche

So korrespondieren die gemessenen Längenänderungen der Gußstützen (Bild 20) ganz eindeutig mit den zugehörigen Gußtemperaturen (Bild 28).

Da die Versuchslast bei allen Gußstützen nahezu gleich war, müssen auch die auf eine Temperatur und auf die jeweilige Stützenlänge bezogenen Längenänderungen gleich sein. Dies gilt auch für die betonverfüllte Stütze, solange der Betonkern keine Lastanteile übernimmt. In Tabelle 8 sind die bezogenen Längenänderungen für den Zeitpunkt der maximalen Stützenverlängerung dargestellt; die gute Übereinstimmung ist offenkundig.

Die zeitliche Verzögerung der Längenänderung bei Versuch 3B gegenüber den beiden unverfüllten Gußstützen 1 und 2 ist identisch mit der verzögerten Aufheizung in Bild 28 von 7,0 bis 7,5 min.

Der Einfluß des Füllbetons auf das Tragverhalten von Gußstützen ist an der plastischen Stauchung zu erkennen. Die beiden unverfüllten Gußstützen versagten 6,5 min bzw. 7 min nach dem Einsetzen größerer plastischer Stauchungen. Dagegen versagte die verfüllte Gußstütze 3B erst 19 min nach dem Einsetzen größerer plastischer Stauchungen, wobei die Stauchungen deutlich langsamer zunahmen (Bild 20). Offensichtlich übernahm der Betonquerschnitt gegen Versuchsende in zunehmendem Maße

Anteile der Versuchslast.

Die plastischen Stauchungen ab Erreichen der maximalen Verlängerung bis zum Versagenszeitpunkt lagen bei den beiden unverfüllten Gußstützen bei 4 ‰ bis 5 ‰, bei der verfüllten Gußstütze bei 8,5 ‰.

### 10.2.2 Stummelversuche

Der Vergleich der Längenänderungen verfüllter und unverfüllter Gußstummel (Bilder 21 bis 23) bestätigt die bei den Stützenversuchen festgestellte Charakteristik:

- Bei beiden Versuchstypen stellt sich die gleiche maximale Verlängerung ein.
- Bei gleicher Brandbeanspruchung erfolgt die Aufheizung der verfüllten Gußstummel mit deutlicher, zeitlicher Verzögerung (Bilder 21 und 22).
- Die plastischen Stauchungen nehmen bei verfüllten Gußstummeln wesentlich langsamer zu. Offensichtlich übernimmt der Betonkern zunehmend Anteile der zu Beginn voll auf das Gußprofil wirkenden Versuchslast.
- Aus den beiden vorgenannten Effekten ergibt sich für verfüllte Gußstummel eine deutliche Steigerung der Feuerwiderstandsdauer gegenüber unverfüllten Gußstummeln.

Bei den Versuchen 6 und 6B (Bild 23) fehlt die zeitlich verzögerte Verlängerung des verfüllten Gußstummels. Dies bestätigt die in Abschnitt 10.1.2 angeführte Vermutung, daß hier eine unterschiedliche Brandbeanspruchung vorgelegen haben muß.

Bemerkenswert sind die gemessenen Stauchungen bis zum Versagen der Versuchskörper. Sie lagen bei Versagenstemperaturen von 655 °C bis 785 °C zwischen 21,1 ‰ und 30,5 ‰.

### 10.3 Seitliche Verformungen (Ausbiegungen)

Infolge der gewählten Abmessungen der Gußstummel sowie der kontrollierten zentrischen Lasteinleitung konnten sich bei diesen Brandversuchen keine seitlichen Verformungen (Ausbiegungen) einstellen. Dies wird durch die nahezu gleiche Veränderung der beiden seitlich an der oberen

Kopfplatte angebrachten Meßpunkte bestätigt (Bilder 21 bis 24).

Bei den Stützenversuchen wurden die Ausbiegungen etwas über der Stützenmitte in zwei Richtungen gemessen, und zwar in Nord/Süd- sowie in Ost/West-Richtung. Die Gußstützen waren so eingebaut, daß die Stützenkopfaussteifungen (Bilder 3 und 4) am Fußpunkt in Nord/Süd-Richtung wiesen. Trotz der daraus resultierenden etwas geringeren Schlankheit in dieser Richtung wiesen die resultierenden Ausbiegungen bei jedem Versuch in eine andere Richtung; die Biegerichtung war offensichtlich durch geometrische und/oder strukturelle Imperfektionen vorgegeben. In den Bildern 25 bis 27 sind die gemessenen Ausbiegungen in den beiden vorgenannten Richtungen dargestellt. Der jeweils letzte gemessene Wert wurde kurz vor dem Versagen aufgenommen. Die maximalen Ausbiegungen nach dem Versagen der Stützen waren wesentlich größer und lagen außerhalb des verfügbaren Meßbereichs.

#### 11. Tragverhalten gußeiserner Hohlprofilstützen

Die Brandversuche an Gußstummeln und Gußstützen haben gezeigt, daß die Verformbarkeit von Grauguß zumindest bei überwiegender Druckbeanspruchung im höheren Temperaturbereich mit dem von Baustahl vergleichbar ist. Trotz verschiedener kleinerer und größerer Lunkerstellen wurde im Gegensatz zu zwei "Kaltversuchen" in keinem Fall ein frühzeitiges örtliches Versagen von Querschnittsteilen beobachtet. Bei allen Stützenversuchen war - wenn auch weniger ausgeprägt als bei den Stummelversuchen - ein Versagen des Querschnitts in Stützenmitte optisch erkennbar. Dies bestätigt die in Abschnitt 3 angestellten Vorüberlegungen zum Tragverhalten von Gußstützen bei einer Bemessung entsprechend DIN 1051 /9/.

##### 11.1 Unverfüllte Hohlprofile

Infolge der relativ gleichmäßigen Erwärmung - geringe Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Temperatur der Innenwandung - kann bei unverfüllten Hohlprofilen die Oberflächentemperatur als Versagenskriterium verwendet werden.

In den Bildern 30 und 31 ist der Zusammenhang zwischen Versagenstempe-

ratur und Belastung aller Stützen- und Stummelversuche dargestellt. Die Belastung ist dabei in Bild 30 auf die schlankheitsabhängige Gebrauchslast gemäß DIN 1051 /9/ bezogen, während in Bild 31 die rechnerische Quetschlast (Druckfestigkeit \* Fläche) die Bezugsgröße darstellt. Die schlankheitsbezogene Darstellung ergibt keinen einheitlichen Zusammenhang zwischen Belastung und Versagenstemperatur. Dagegen bestätigt Bild 31, daß bei einer querschnittsbezogenen Darstellung die Ergebnisse der Stützen- und Stummelversuche miteinander vergleichbar sind.

Da in vielen Fällen die Druckfestigkeit von Hohlstützen aus Grauguß nicht bekannt und auch kein Nennwert in DIN 1051 /9/ angegeben ist, muß für die praktische Ermittlung der Versagenstemperatur eine andere Bezugsgröße gefunden werden.

Bild 32 zeigt, daß sich der Zusammenhang zwischen Belastung und Versagenstemperatur auch bezogen auf die zulässige Querschnittsbeanspruchung gemäß DIN 1051 darstellen läßt. Die zulässige Querschnittsbeanspruchung ergibt sich aus der zulässigen Druckspannung für Säulen von  $\sigma_{zul} = 900 \text{ kg/cm}^2$  (ca.  $9,0 \text{ kN/cm}^2$ ), multipliziert mit der Querschnittsfläche.

Die Versagenstemperatur von gußeisernen Hohlprofilen unter Gebrauchslast kann nach den vorliegenden Versuchsergebnissen mit  $T_F = 725^\circ\text{C}$  angenommen werden. Diese Versagenstemperatur gilt für den gesamten zulässigen Schlankheitsbereich von  $\lambda = l_0/i \leq 100$ . Bei von der Gebrauchslast abweichenden Stützenlasten kann die zugehörige Versagenstemperatur aus Bild 31 oder 32 direkt abgelesen werden. Leider fehlen weitere Versuchsergebnisse mit deutlich abgeminderten Versuchslasten, so daß die Erhöhung der Versagenstemperatur bei nur teilweiser Ausnutzung der Gebrauchslast nur geschätzt werden kann. Auf der sicheren Seite liegend, ist in solchen Fällen die Kurve in Bild 31 bzw. Bild 32 linear zu extrapolieren.

## 11.2 Betonverfüllte Hohlprofile

Die Brandversuche an betonverfüllten Hohlprofilen ergaben einen eindeutig günstigen Einfluß auf das Trag- und Verformungsverhalten solcher Bauteile. Nach dem Einsetzen plastischer Stauchungen des Gußprofils übernimmt der Betonkern offensichtlich einen Teil der Auflast und bewirkt damit eine entsprechende Entlastung des Gußquerschnitts.

Welchen Lastanteil der Betonkern noch in der Lage ist zu übernehmen, hängt von der Betongüte, primär jedoch von den erreichten Betontemperaturen ab, die eine entsprechende Materialentfestigung des Betons bewirken. Bei rein zentrischer Belastung (Quetschversuche an Gußstummeln) wurden auch die inneren, noch relativ gering erwärmten Betonbereiche voll aktiviert. In der Endphase der Stützenversuche wurden zunehmende, seitliche Ausbiegungen beobachtet. Hier ist daher der vom Betonkern noch aufnehmbare Momentenanteil maßgebend. Damit haben die wesentlich höheren Temperaturen des äußeren Betonbereichs entscheidenden Einfluß auf das Tragverhalten betonverfüllter Hohlprofile. Dies erklärt das gegenüber den betonverfüllten Gußstummeln weniger günstige Versuchsergebnis der betonverfüllten Gußstütze 3B.

Die Betontemperaturen, insbesondere im äußeren profilnahen Bereich, werden wesentlich vom Profilbeiwert  $U/A$  des Gußprofils beeinflusst. Die Oberflächentemperatur des Gußprofils ist daher im Gegensatz zu den unverfüllten Hohlprofilen als Versagenskriterium wenig geeignet.

Trotzdem kann die Versagenstemperatur von  $775^{\circ}\text{C}$  der betonverfüllten Gußstütze 3B als ungefähre untere Grenze für betonverfüllte Gußprofile angenommen werden, da zwei gegenläufige Effekte vorliegen. Kleinere Querschnittsabmessungen bedingen größere  $U/A$ -Werte und führen zu einer schnelleren Erwärmung des Betonquerschnitts (ungünstig). Kleinere Querschnittsabmessungen bedingen jedoch auch größere Schlankheiten. Das Bemessungskonzept von DIN 1051 bewirkt aber eine mit zunehmender Schlankheit deutlich zunehmende Tragreserve des Gußprofils (günstig).

## 12. Erwärmungsverhalten von Grauguß

Zur Überprüfung des Erwärmungsverhaltens von Grauguß sind nur die Ergebnisse der drei Stützenversuche geeignet (siehe Abschnitt 10.1). Die rechnerische Bestimmung der sich bei einer Brandbeanspruchung einstellenden Bauteiltemperatur ist bekannt. Bei ungeschützten dünnwandigen Stahl- oder Gußquerschnitten läßt sich das Erwärmungsproblem mit Hilfe der linearen Differentialgleichung

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{U}{A} (T_B - T)$$

beschreiben. Für mehrschichtige und/oder massive Querschnitte ist ein zweidimensionaler Ansatz erforderlich, der zu der Fourierschen Differentialgleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

führt. Während der Profilbeiwert  $U/A$  (Umfang/Fläche) eine von der Temperatur unabhängige Querschnittsgröße darstellt, handelt es sich bei den weiteren Parametern um temperaturabhängige Stoffwerte. Diese sind:

Wärmeübergangszahl	$\alpha$	(W/m <sup>2</sup> K)
Wärmekapazität	$c_p$	(kJ/kgK)
Dichte	$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	(W/mK)
Emissionszahl	$\epsilon_r$	(-)

Tabelle 10 zeigt, daß schon für Raumtemperatur in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden sind. Im Vergleich zu Stahl läßt sich jedoch eine eindeutige Tendenz feststellen. So hat Grauguß gegenüber Stahl eine geringere Dichte, eine höhere Wärmekapazität und eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

Vergleichsrechnungen mit den im Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" an der Technischen Universität Braunschweig zur Verfügung stehenden Rechenprogrammen /6, 8/ haben gezeigt,



daß die im Versuch gemessenen Bauteiltemperaturen mit guter Übereinstimmung berechnet werden können. Der Ansatz der thermischen Stoffwerte für Stahl /7/ führte, wie dies die Angaben für Raumtemperatur vermuten lassen, zu einer Unterschätzung des Erwärmungsverhaltens von Grauguß. Eine leichte Anhebung der Werte  $C_p$  und  $\lambda$  brachte die in den Bildern 12 und 28 gezeigte gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und errechneten Bauteiltemperaturen. Für die Dichte von Grauguß wurde konstant  $\rho = 7200 \text{ kg/m}^3$  angenommen; die Emissionszahl wurde auf  $\epsilon_r = 0,7$  gesetzt.

Die Brandversuche an betonverfüllten Gußprofilen zeigten neben dem gegenüber unverfüllten Profilen günstigeren Tragverhalten auch ein günstigeres Erwärmungsverhalten. Sowohl bei unverfüllten als auch bei betonverfüllten Hohlprofilen hat der Profilbeiwert einen erheblichen Einfluß auf die Geschwindigkeit, mit der sich der Querschnitt aufheizt. Nach /3/ liegen die Profilbeiwerte der in der Praxis verwendeten Gußhohlprofile bei  $20 \leq U/A \leq 95$  (siehe Tabelle 9). Eine rechnerische Studie über den Einfluß des Profilbeiwerts  $U/A$  in dem vorgenannten Bereich zeigt Bild 33. In diesem Bild sind die Oberflächentemperaturen in der 30. Minute sowie in der 60. Minute für unverfüllte, betonverfüllte und für betonverfüllte Hohlprofile mit einem zusätzlichen "F 30"-Anstrich aufgeführt. Für die in Abschnitt 11 definierten Versagenstemperaturen bei voller Gebrauchslast ergeben sich die in Tabelle 11 geforderten Brandschutzmaßnahmen zur Einordnung in die Feuerwiderstandsklassen "F 30", "F 60" und "F 90". Bei von der zulässigen Gebrauchslast abweichenden Stützenlasten können die in Tabelle 11 angegebenen  $U/A$ -Grenzen für die jeweilige Variante anhand der Angaben in den Bildern 31, 32 und 33 modifiziert werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß in dieser Untersuchung die Profilbeiwerte  $U/A$  korrekt unter Berücksichtigung des äußeren Umfanges dividiert durch die Querschnittsfläche des Hohlprofils, ermittelt wurden, da der meist benutzte Ansatz  $U/A = 1/t$  mit zunehmender Wandstärke  $t$  eine zu grobe Annäherung darstellt. Die Ermittlung des Profilbeiwertes von hohlen Rundprofilen sollte stets mit dem korrekten Ansatz  $U/A = D/(D-t)t$  erfolgen.

### 13. Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse

Vorrangiges Ziel dieser Untersuchung war es, gesicherte, verallgemeinerungsfähige Aussagen über die Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Stützen aus Hohlprofilen zu erarbeiten. Außerdem sollten die Auswirkungen von Maßnahmen untersucht werden, die die Feuerwiderstandsfähigkeit von gußeisernen Stützen verbessern können.

Das vorgesehene Konzept, anhand umfangreicher Materialuntersuchungen realistische, temperaturabhängige Materialgesetze zu erarbeiten und diese durch Vergleichsrechnungen mit den Ergebnissen von fünf Stützenversuchen abzusichern, konnte nicht durchgeführt werden. Das gerettete Abbruchmaterial reichte nur zu drei Stützenversuchen mit relativ geringer Schlankheit. Vorüberlegungen und Vergleiche mit den Ergebnissen aus Brandversuchen an Stahlstützen führten zu der begründeten Vermutung, daß Gußstützen infolge ihrer geringen Auslastung und ihrer geringen wirksamen Schlankheit im Brandfall erst dann versagen, wenn ihre Querschnittstragfähigkeit erschöpft ist. Deshalb wurden lediglich die Materialkennwerte unter Raumtemperatur ermittelt und zusätzlich sieben Brandversuche sowie zwei "Kaltversuche" an Gußstummeln zur Ermittlung der temperaturabhängigen Quetschlast durchgeführt.

Die angestellten Vorüberlegungen wurden durch die Ergebnisse der Brandversuche voll bestätigt. Danach kann die Versagenstemperatur von gußeisernen Hohlprofilen in Abhängigkeit von der vorhandenen Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  oder der zulässigen Querschnittsbeanspruchung nach DIN 1051 /9/ definiert werden. Bei zulässiger Gebrauchslast gemäß dieser Norm kann die Versagenstemperatur für den gesamten zulässigen Schlankheitsbereich von  $\lambda \leq 100$  mit  $T_u = 725^\circ\text{C}$  angegeben werden. Bei von der zulässigen Gebrauchslast abweichenden Stützenlasten kann die Versagenstemperatur mit Hilfe der Bilder 31 und 32 modifiziert werden.

Rechnerische Untersuchungen haben gezeigt, daß sich gußeiserne Hohlprofile etwas schneller als vergleichbare Stahlprofile erwärmen. Die Aufheizgeschwindigkeit wird wesentlich vom Profilbeiwert  $U/A$  beeinflusst. In einer Parameterstudie wurden die Gußtemperaturen in der 30. Minute und in der 60. Minute in Abhängigkeit der baupraktisch relevanten Profilbeiwerte  $U/A$  ermittelt. Damit ist eine realistische Abschätzung der Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Hohlstützen und ihre Zuordnung in

eine Feuerwiderstandsklasse möglich. So sind für gußeiserne Hohlprofile unter zulässiger Gebrauchslast gemäß DIN 1051 und einem Profilbeiwert von  $U/A \leq 45 \text{ m}^{-1}$  keine Brandschutzmaßnahmen zur Einordnung in die Feuerwiderstandsklasse "F 30" erforderlich.

Da aus architektonischen Gesichtspunkten die Oberfläche von gußeisernen Hohlsäulen in der Regel sichtbar bleiben soll, verbleiben nur zwei Möglichkeiten, die Feuerwiderstandsdauer solcher Stützen zu verbessern.

Das Verfüllen und Verdichten des Hohlraums mit einem hochwertigen Beton ( $\geq \text{B } 35$ ) hat einen zweifach günstigen Einfluß auf die Feuerwiderstandsdauer. Der Füllbeton übernimmt einen Teil der auf das Profil einwirkenden Wärmemenge und bewirkt damit eine langsamere Erwärmung des Gußprofils. Außerdem übernimmt der Beton nach dem Einsetzen plastischer Stauchungen des Gußprofils einen Teil der Auflast und entlastet somit das Gußprofil. Betonverfüllte gußeiserne Hohlprofile können ohne Beschränkung der Feuerwiderstandsklasse "F 30" zugeordnet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Feuerwiderstandsdauer von Hohlprofilen stellen die für Stahlbauteile zugelassenen dämmschichtbildenden Anstriche dar. Nach /5/ wurde bei Stahlrohren mit einem vergleichsweise hohen Profilbeiwert von  $U/A = 105 \text{ m}^{-1}$  die kritische Temperatur von  $500^\circ\text{C}$  nach 30 min knapp überschritten. Bei der wesentlich höheren Versagenstemperatur gußeiserner Hohlprofile können mit solchen Anstrichen versehene Gußstützen uneingeschränkt der Feuerwiderstandsklasse "F 30" zugeordnet werden, sofern der Anstrich für geschlossene Profile zugelassen ist; bei offenen Profilen ist ggf. eine weitere Beurteilung und eventuell eine Zustimmung im Einzelfall (Abweichung vom Zulassungsbescheid) erforderlich.

Eine Zuordnung in die Feuerwiderstandsklasse "F 60" ist dagegen auch bei betonverfüllten Hohlprofilen nur für geringe Profilbeiwerte von  $U/A \leq 23 \text{ m}^{-1}$  möglich.

Auch die Anbringung eines "F 30"-Anstriches, der in Verbindung mit einer Betonfüllung die Gußtemperaturen bis zur 30. Minute deutlich unter  $500^\circ\text{C}$  halten würde, stellt nur für relativ kleine Profilbeiwerte eine mögliche Lösung dar. Da hierzu keine Versuchsergebnisse vorliegen, ist diese Aussage als eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung zu

werten. Verbesserte dämmschichtbildende Anstriche könnten sicherlich mit oder auch ohne gleichzeitige Betonfüllung zu einer deutlichen Verbesserung der Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Hohlprofile führen. Zur Bestätigung wären lediglich einige Erwärmungsversuche an entsprechend präparierten Gußstummeln erforderlich.

Die vorgestellten Ergebnisse zum Brandverhalten gußeiserner Hohlprofile können nicht auf offene Profile übertragen werden.

#### 14. Literatur und Normen

- /1/ Dubbel: Taschenbuch für Maschinenbau, Band I, 13. Auflage, Neudruck 1974, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York.
- /2/ Piwowarsky, E.: Gußeisen, 2. Auflage, Neudruck 1958, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- /3/ Stahl im Hochbau, 12. Auflage, Neudruck 1959, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf.
- /4/ Wärmetechnische Isolierung, 22. Auflage, 1974, Gründzweig + Hartmann und Glasfaser-AG.
- /5/ Stanke, J.: Die Wirksamkeit dämmschichtbildender Brandschutzbeschichtungen in Abhängigkeit vom Stahlbauprofil (Teil 1 und 2). Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), 1975 und 1977. Forschungsvorhaben, gefördert vom Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen.
- /6/ Hoffend, F.: Das Brandverhalten von Stahlstützen - Versuche und Berechnung, Sonderforschungsbeereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen". Arbeitsberichte 1975 - 1977, Teil I, Technische Universität Braunschweig.
- /7/ Haß, R.: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Dissertation 1986, Technische Universität Braunschweig.
- /8/ Becker, I.; Bizri, H.; Bresler, B.: FIRES-T, A Computer Program for the Fire Response of Structures-Thermal. UCB Fire Research Group, University of California, Berkeley, 1974.
- /9/ DIN 1051, Ausgabe Februar 1937. Berechnungsgrundlagen für Grauguß im Hochbau.
- /10/ DIN 4114 Teil 1 und 2, Ausgabe Juni 1952 und Februar 1953. Berechnungsgrundlagen für Stabilitätsfälle im Stahlbau.

- /11/ DIN 18 800, Teil 1, Ausgabe März 1981. Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion.
- /12/ DIN 1691, Ausgabe Mai 1985, Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß).
- /13/ Beiblatt 1 zu DIN 1691, Ausgabe Mai 1985. Anhaltswerte der mechanischen und physikalischen Eigenschaften.
- /14/ DIN 50 106, Ausgabe Dezember 1978. Prüfung metallischer Werkstoffe, Druckversuch.
- /15/ DIN 50 109, Ausgabe März 1968. Prüfung von Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß), Zugversuch.
- /16/ DIN 50 145, Ausgabe Mai 1975. Prüfung metallischer Werkstoffe, Zugversuch.
- /17/ DIN 50 125, Ausgabe April 1951. Prüfung metallischer Werkstoffe, Zugversuch, Richtlinien für die Herstellung.
- /18/ DIN 4102 Teile 2 und 4, Ausgabe 09.77 und 03.81. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
- /19/ DIN 1048, Ausgabe Januar 1972. Prüfverfahren für Beton.
- /20/ European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures. ECCS-Technical Committee 3- Fire Safety of Steel Structures. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1983

**Tabelle 1: Materialkennwerte der Gußstützen und Gußstummel**

Versuch Nr.	Zugproben <sup>1)</sup>						Druckproben <sup>3)</sup>					Druckproben <sup>4)</sup>				
	E	R <sub>p0,1</sub>	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	ε <sub>u</sub>	R <sub>m</sub> <sup>2)</sup>	E <sub>d</sub>	σ <sub>d0,1</sub>	σ <sub>d0,2</sub>	σ <sub>dB</sub>	ε <sub>B</sub>	E <sub>d</sub>	σ <sub>d0,1</sub>	σ <sub>d0,2</sub>	σ <sub>dB</sub>	ε <sub>B</sub>
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
1	-	-	-	-	-	-	88.340	222	271	502	6,7	96.281	227	266	457	9,4
2	54.220	106	118	123	0,60	128	91.743	208	250	476	7,7	97.344	227	264	466	8,3
3B	52.160	113	126	127	0,48	140	94.663	221	271	531	7,3	-	-	-	-	-
4 + 4B	58.740	124	139	139	0,50	155	90.457	250	292	562	7,3	-	-	-	-	-
5 + 5B	-	-	-	-	-	-	85.420	225	271	511	5,0	-	-	-	-	-
6 + 6B	68.310	135	152	158	0,56	159	99.567	255	295	570	9,2	-	-	-	-	-
7 + 7B	54.555	114	130	131	0,47	135	87.667	266	305	568	7,6	-	-	-	-	-
	Mittelwerte aus zwei Proben						Mittelwerte aus drei Proben					Mittelwerte aus vier Proben				

1) Prüfung gemäß DIN 50 145 an Proben B 8 x 40 nach DIN 50 125

2) Prüfung gemäß DIN 50 109 an aus dem Gußstück ausgearbeiteten Proben

3) Prüfung gemäß DIN 50 106 an zylindrischen Proben (d<sub>0</sub> = 16 mm, h<sub>0</sub> = 24 mm)

4) Prüfung wie 3) nach dem Brandversuch (Restfestigkeit)

**Tabelle 2: Mischungsaufbau des verwendeten Betons**

Angaben	Werte	Dimension
Betonsorten-Nr.	6223	-
Betongüte	B 35	-
Portlandzement PZ 35 F	400	kg/m³
Zuschläge	1750	kg/m³
Sieblinie	A/B 16	-
Gesamtwasser	195	l/m³
W/Z-Wert	0,48	-
Ausbreitmaß	46/47	cm

**Tabelle 3: Festigkeitswerte des verwendeten Betons**

Versuchskörper	Alter	$\beta_{WM}^{1)}$	Behandlung und Lagerung
-	Tage	N/mm²	-
Gußstumme1	28	46	7 Tage Wasserlagerung, 21 Tage Norm- klima gemäß DIN 1048
	122 <sup>2)</sup>	49	am Bauteil gelagert
	122 <sup>2)</sup>	30	mit Paraffin abgedichtet
Gußstütze	28	48	7 Tage Wasserlagerung, 21 Tage Norm- klima gemäß DIN 1048
	183 <sup>2)</sup>	51	am Bauteil gelagert
	183 <sup>2)</sup>	40	mit Paraffin abgedichtet
1) Mittelwert aus 3 Würfelprüfungen (15 x 15 x 15)			
2) Alter beim Brandversuch			



Tabelle 4: Querschnittswerte der Gußstummel

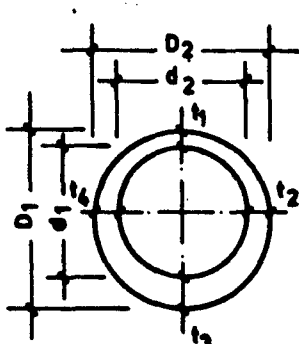
<p>Länge = 900 mm</p> 	Ver- such	D <sub>1,2</sub>	d <sub>1,2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>
	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	4	175 175	122 120	23	29	30	26
	4B	178 176	122 122	27	27	29	26
	5	206 200	156 158	17	20	32	22
	5B	204 201	156 156	17	24	31	21
	6	175 176	130 130	20	22	25	24
	6B	174 175	132 130	19	22	23	23
	7	173 175	135 136	16	21	22	18
	7B	175 176	134 138	17,5	21,0	23,5	17,0

Tabelle 5: Querschnittswerte der Gußstützen

Versuch	Abstand vom Fußpunkt	D <sub>1,2</sub>	d <sub>1,2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>
-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	0	-	156 157	-	-	-	-
	1017	237 238	-	-	-	-	-
	2056	235,5 232,5	163 162,5	33,5	32,5	39	37,5
	3482	230,7 231,7	-	-	-	-	-
	4112	300 302	230 229,5	34,5	40	35,5	32,5
2	0	-	186 183,5	-	-	-	-
	1620	242 236	178 182	37	27,5	27	26,5
	3240	239 237	183 183	30	27	26	27
3 B	0	-	183,5 183	-	-	-	-
	1620	241,5 236,5	-	-	-	-	-
	3240	242 236,5	182,5 181	25	28,5	34,5	27

Tabelle 6: Lastannahmen nach DIN 1051, Feb. 1937, Tafel 1 und 2 /9/

Raumtemperatur			im Brandfall	
Bemessung nach Euler-Fall II			Euler-Fall IV mit Last nach Euler-Fall II	
$\lambda = \frac{l}{i}$	$\omega$	$\frac{\text{zul } N}{\text{zul } \sigma \cdot A}$	$\frac{\text{vorh } N}{\text{zul } \sigma \cdot A}$	$\frac{\text{vorh } N}{\text{zul } N}$
1	2	3	4	5
0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,01	0,990	0,952	0,962
20	1,05	0,952	0,820	0,861
30	1,11	0,901	0,599	0,665
40	1,22	0,820	0,286	0,349
50	1,39	0,719	0,183	0,255
60	1,67	0,599	-	-
80	3,50	0,286	-	-
100	5,45	0,183	-	-

**Tabelle 7: Statische und brandspezifische Versuchsangaben**

Versuch Nr.	Typ	ℓ	A	U/A	λ	N	$\frac{N}{zul \sigma_d \cdot A^1)}$	$\frac{N}{zul \sigma \cdot A^2)}$	$\frac{N}{\sigma_{dB} \cdot A^3)}$	$T_u^{4)}$	$t_u$
		cm	cm²	m <sup>-1</sup>	-	kN	-	-	-	°C	min
1	Guß- stützen	412	240,1	31	60	1250	0,984	0,578	0,103	730	32
2		324	180,9	41	43	1265	0,996	0,777	0,147	725	33
3B		324	180,9	41	43	1270	1,000	0,780	0,132	790	51
4	Gußstümpfe	90	124,6	44	17	1737	1,577	1,549	0,248	655	26
4B		90	124,6	44	17	1737	1,577	1,549	0,248	800	45
5		90	132,5	48	14	1006	0,853	0,844	0,149	710	39
5B		90	132,5	48	14	1006	0,853	0,844	0,149	820	56
6		90	107,8	51	17	1372	1,458	1,414	0,223	670	30
6B		90	107,8	51	17	1372	1,458	1,414	0,223	785	36
7		60 25	89,9	58	11 5	2400 <sup>5)</sup> 2830 <sup>5)</sup>	3,057 3,605	2,967 3,498	0,444 0,523	2 Kaltversuche	
7B		90	89,9	58	16	809	1,030	1,000	0,150	820	45

1) zulässige (schlankheitsabhängige) Gebrauchslast nach DIN 1051 Febr. 1937 (Tafel 2)

2) zulässige Querschnittsbeanspruchung nach DIN 1051 Febr. 1937

3) rechnerische Quetschlast unter Berücksichtigung von  $\sigma_{dB}$  (Tabelle 1)

4) Versagenstemperatur (gemittelte Gußtemperatur bei ℓ/2)

5) Bruchlast im Kaltversuch

**Tabelle 8:** Bezogene Längenänderungen der Gußstützen bei einer Gußtemperatur von 650 °C

Versuch Nr.	$L_0$	$T_{GG}$	$\Delta L$	t	$\frac{\Delta L(650^\circ C)}{L_0}$
-	mm	°C	mm	min	‰
1	4112	675	25,0	26,5	5,85
2	3240	650	19,0	25,0	5,86
3B	3240	650	18,5	32,0	5,71

**Tabelle 9:** Profilbeiwerte für übliche gußeiserne Hohlstützen nach /3/

D	U/A		
	t = 0,075 D	t = 0,1 D	t = 0,125 D
mm	m <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
100	(144)	(111)	95
200	72	56	46
300	48	37	30
400	36	28	23

D: Außendurchmesser  
t: Wandstärke

**Tabelle 10:** Gegenüberstellung der wichtigsten Kennwerte für das Erwärmungsverhalten von Stahl und Grauguß

Kennwerte bei 18 °C		Dim.	Stahl	Grauguß	Lit.-Stelle
Lin. Ausdehnungskoeffizient	$10^6 \cdot \alpha_t$	$\frac{\text{mm}}{\text{mK}}$	-	9,0	/2/
			11,1	9,0	/1/
			-	13,0	/9/
			12,0	-	/20/
Dichte	$\rho$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-	7200	/2/
			7850	7200	/1/
			-	7100	/9/
			7850	7250	/4/
Wärmekapazität	$c_p$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	-	0,542	/2/
			0,461	0,544	/1/
			-	0,535	/9/
			0,503	0,628	/4/
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	-	50,2	/2/
			50,2	54,4	/1/
			-	52,5	/9/
			52,3	50,0	/4/
Emissionszahl	$\epsilon_r$	-	-	0,81	/4/
			0,80	0,5-0,7	/20/

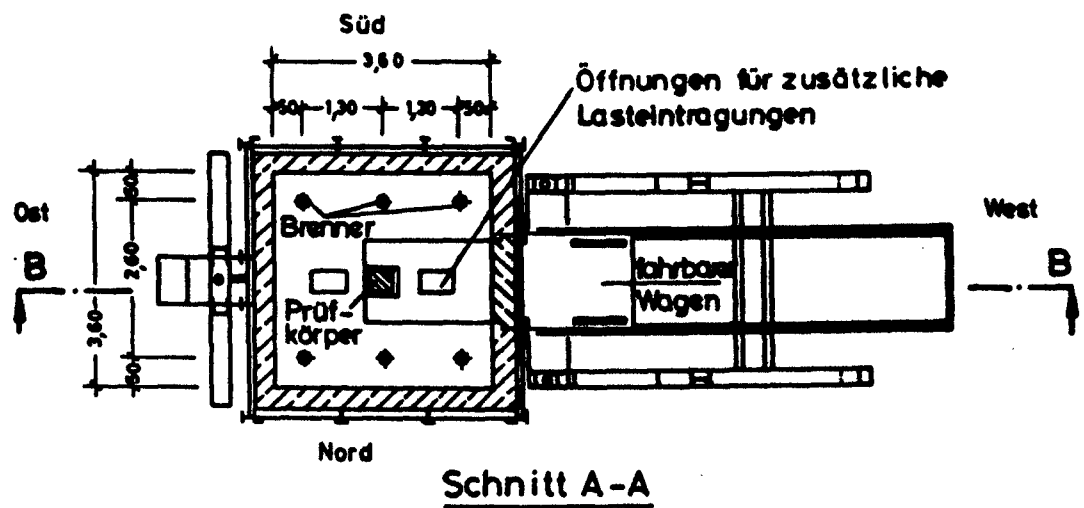
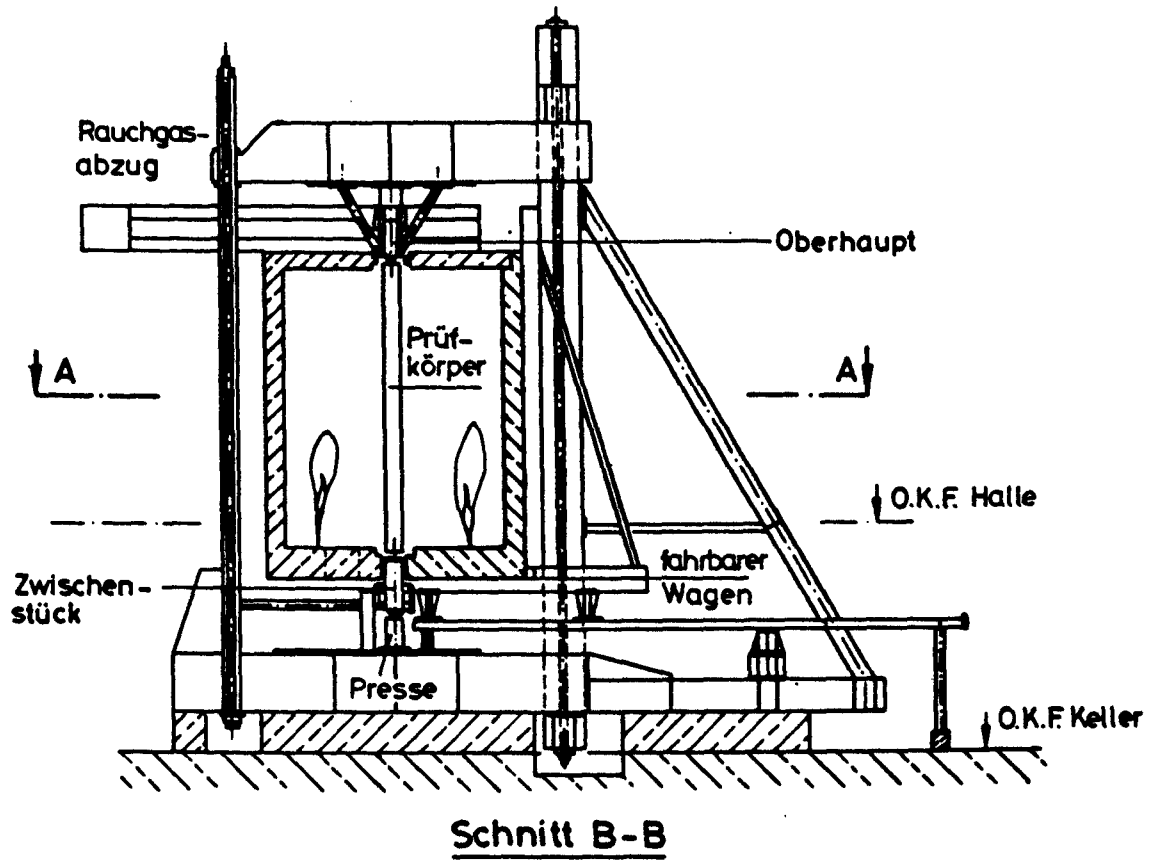
**Tabelle 11:** Brandschutzmaßnahmen zur Einordnung von Hohlsäulen aus Grauguß in die Feuerwiderstandsklassen F 30, F 60 und F 90

Zeile	Brandschutz- maßnahme	zulässiger U/A-Bereich	Bemerkungen	erreichbare Feuer- widerstandsklasse
1	keine	≤ 45	Bei abgeminderter Auflast entsprechend größerer U/A-Bereich möglich 1)	F 30
2	F 30-Anstrich <sup>2)</sup>	unbegrenzt	-	
3	Betonfüllung <sup>3)</sup>	unbegrenzt	-	
4	keine	-	-	Auch bei abgemin- deter Auflast F 60 nicht erreichbar
5	F 30-Anstrich <sup>2)</sup>	-	-	
6	Betonfüllung <sup>3)</sup>	≤ 23	Bei abgeminderter Auflast entsprechend größerer 1) U/A-Bereich möglich	F 60
7	Betonfüllung + F 30-Anstrich <sup>2)</sup>	≤ 30		
8	Zur Erzielung von F 90 sind andere Brandschutzmaßnahmen, z.B. Ummantelungen, erforderlich.			

1) siehe Bilder 31, 32 und 33

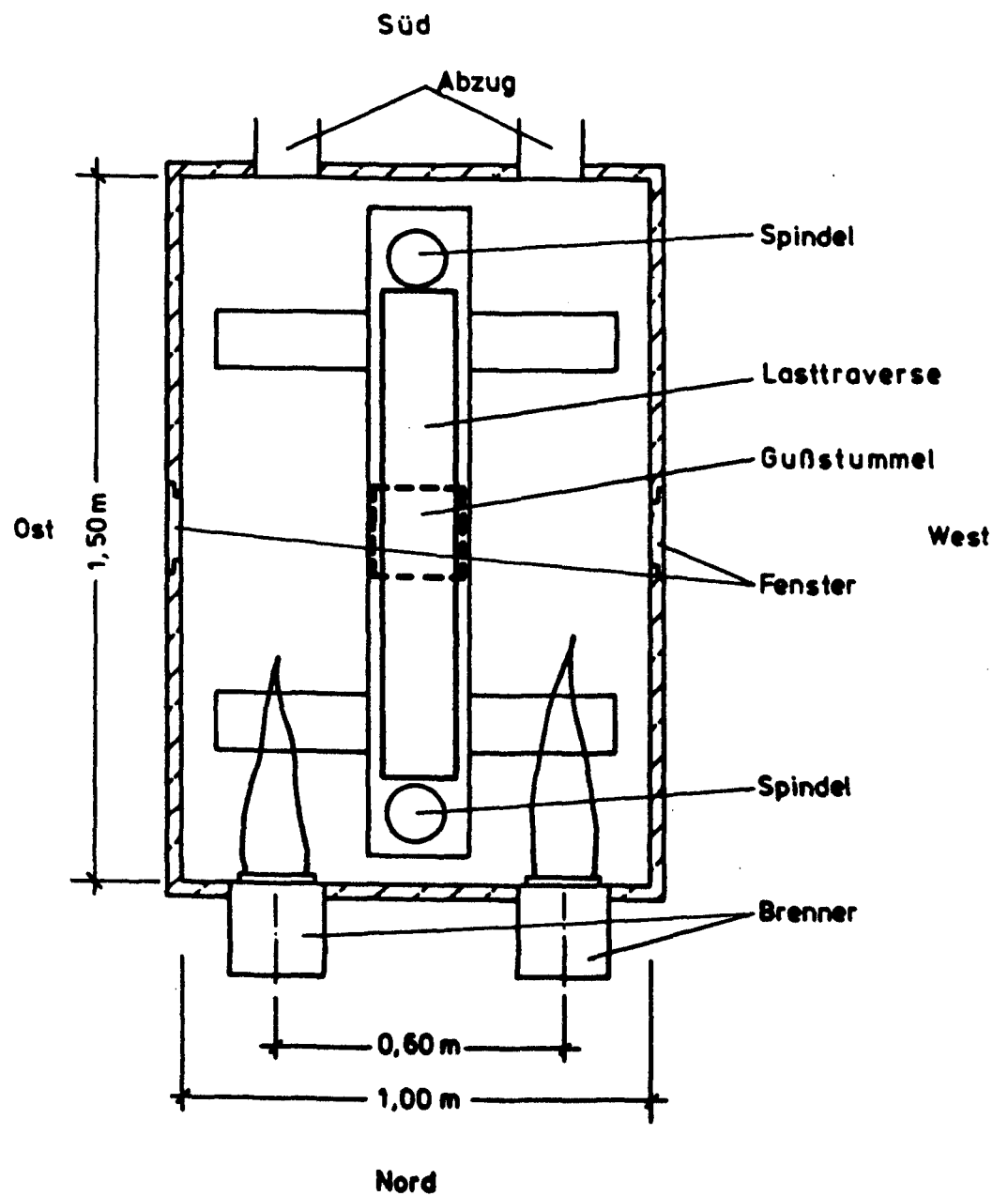
2) gilt nur für geschlossene Profile; bei offenen Profilen sind weitere Überlegungen  
erforderlich

3) erforderliche Betongüte ≥ B 35



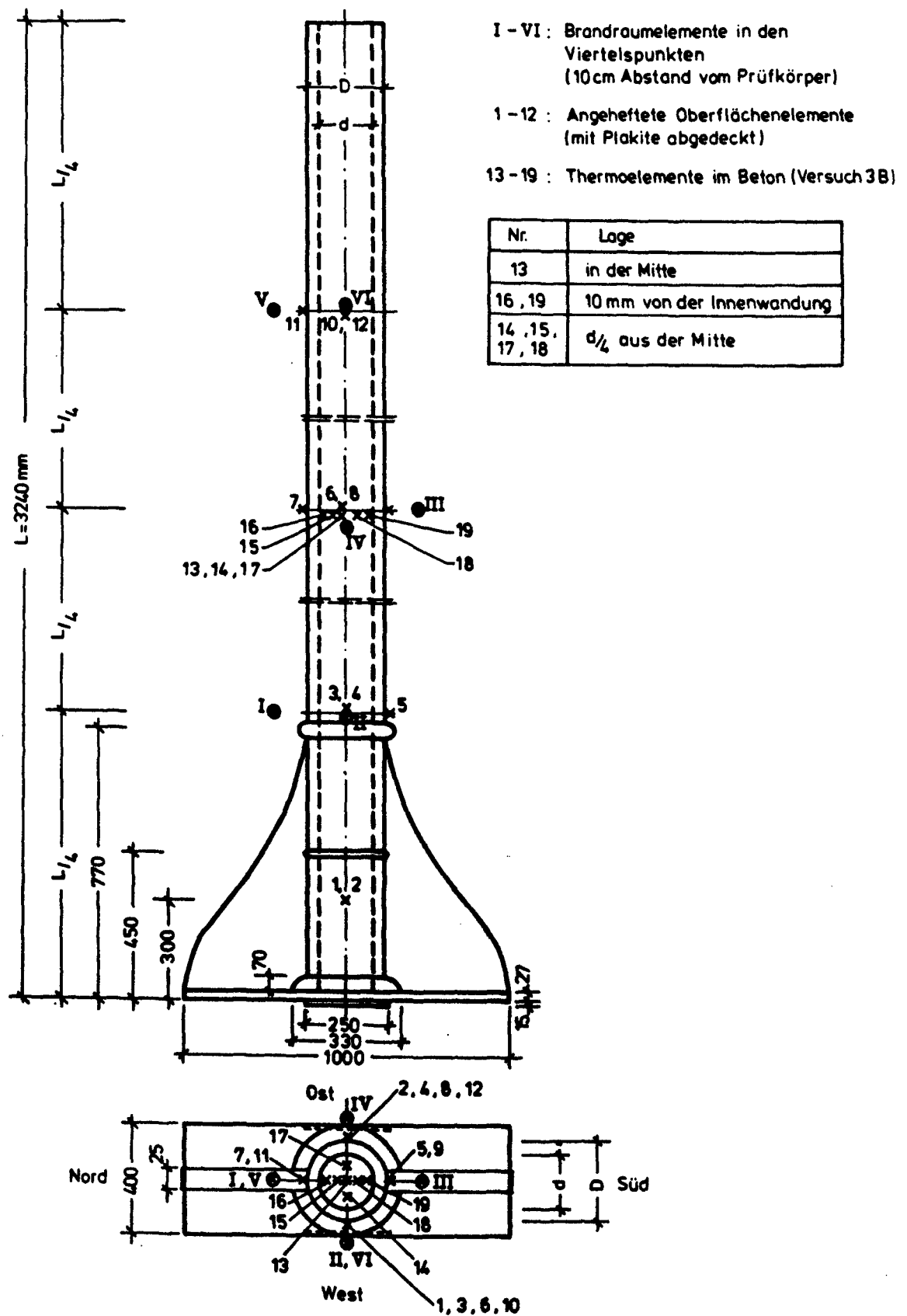
**Bild 1: Stützenbrandhaus**



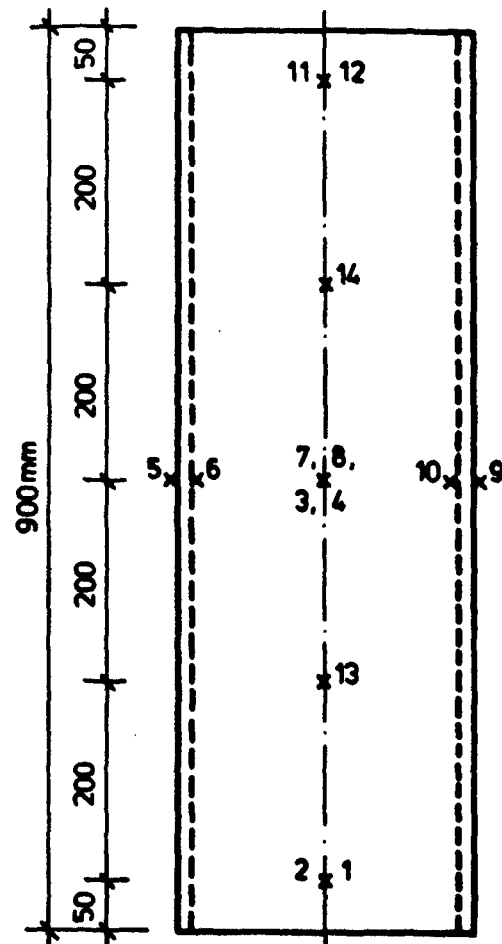


**Bild 2:** Kleinbrandhaus (Grundriß)





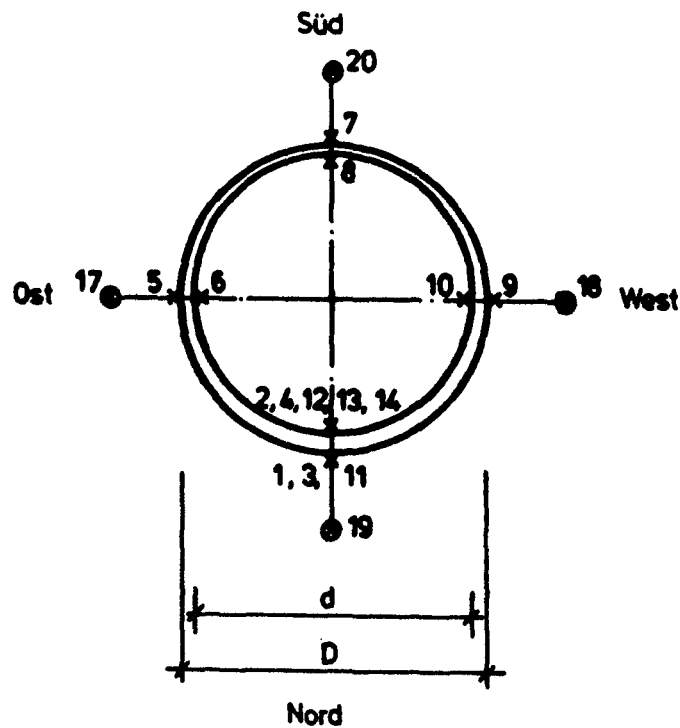
**Bild 4:** Abmessungen und Lage der Temperaturmeßstellen (Gußstützen 2 und 3B)



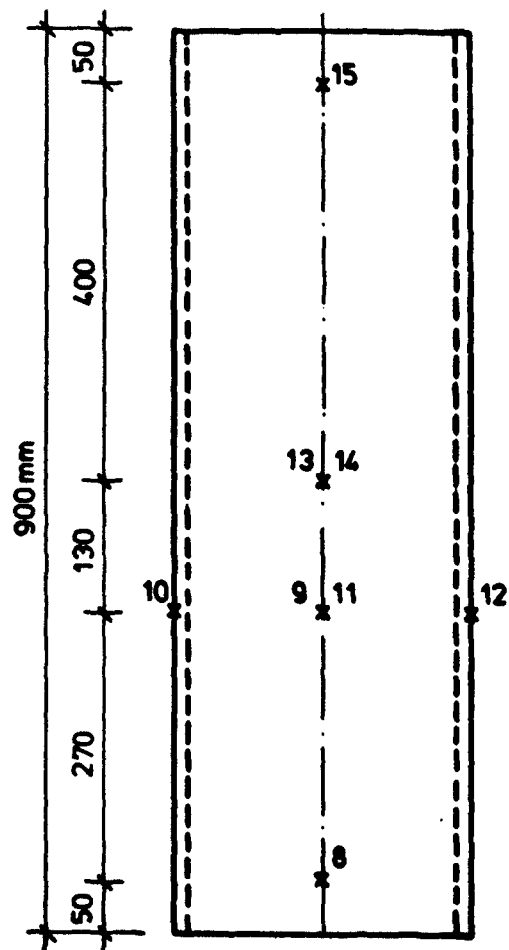
17 - 20 : Brandraumelemente in Stummelmittle (10 cm Abstand vom Prüfkörper)

1 - 14 : Angeheftete Oberflächenelemente (mit Plakite abgedeckt)

15 - 16 : Temperaturen des Belastungsgerüsts (Spindeln).



**Bild 5:** Abmessungen und Lage der Temperaturmeßstellen (Gußstummel ohne Beton)

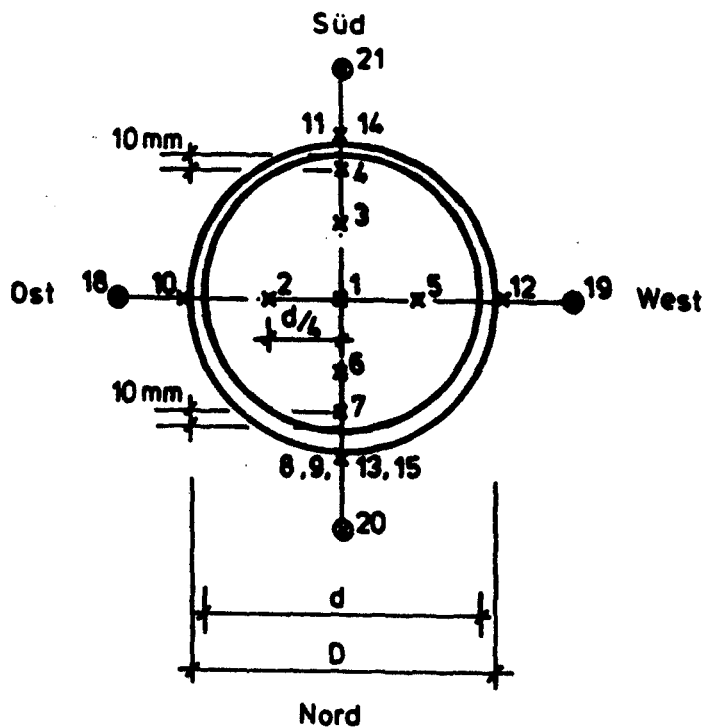


18 - 21 : Brandraumelemente in Stummelmittle (10 cm Abstand vom Prüfkörper)

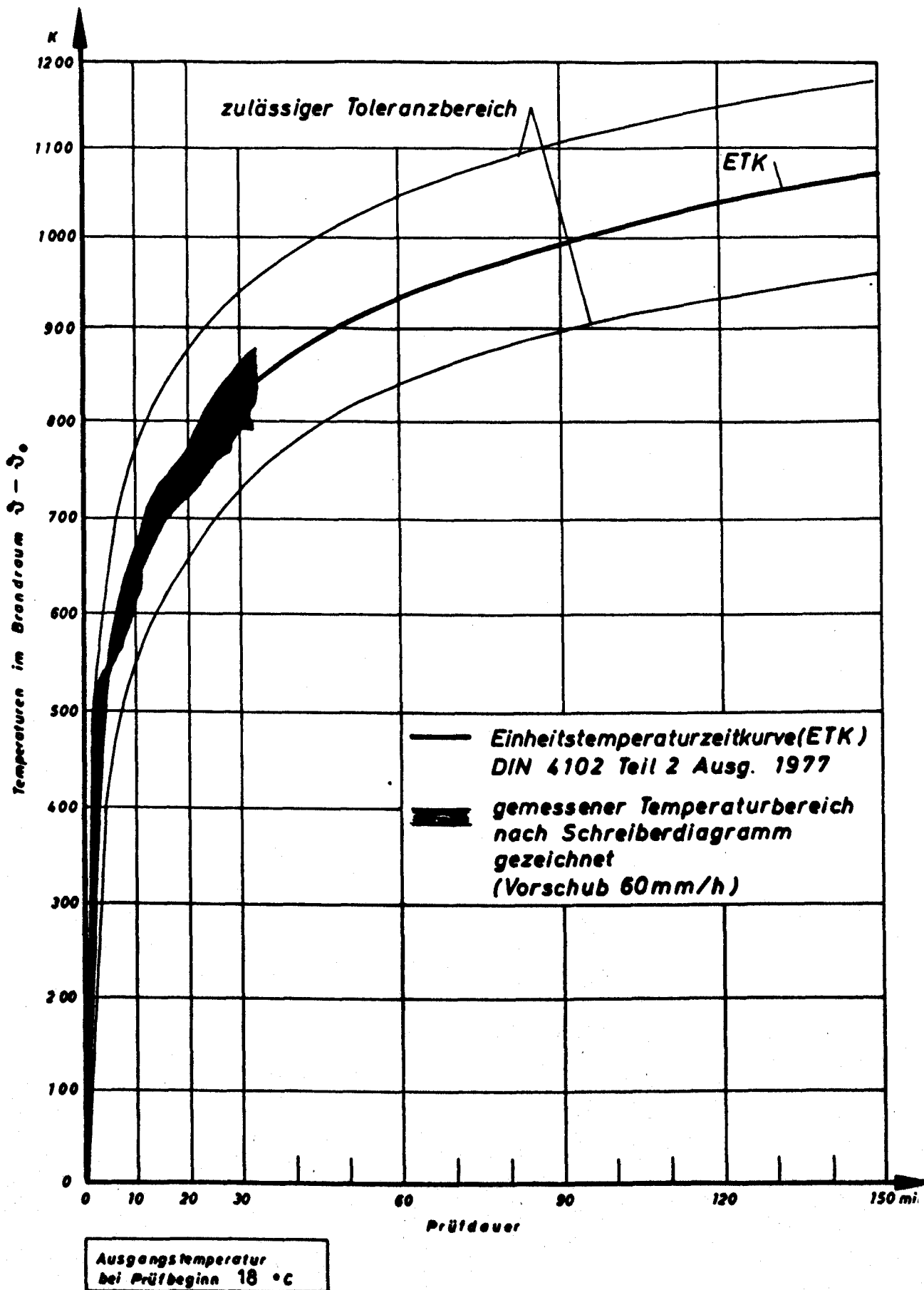
1 - 7 : Thermoelemente im Beton

8-15 : Angeheftete Oberflächenelemente (mit Plakite abgedeckt)

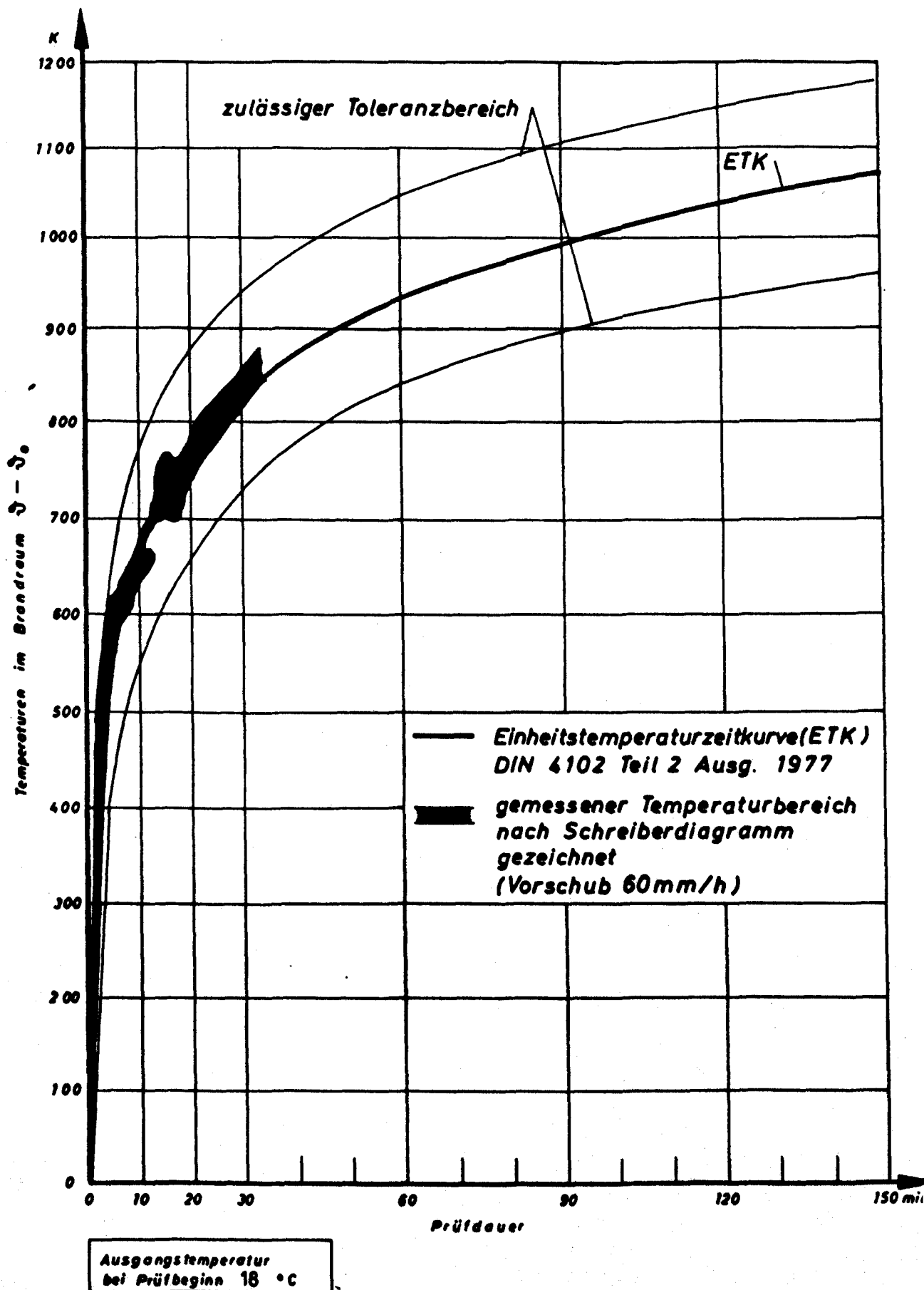
16-17 : Temperaturen des Belastungsgerüsts (Spindeln)



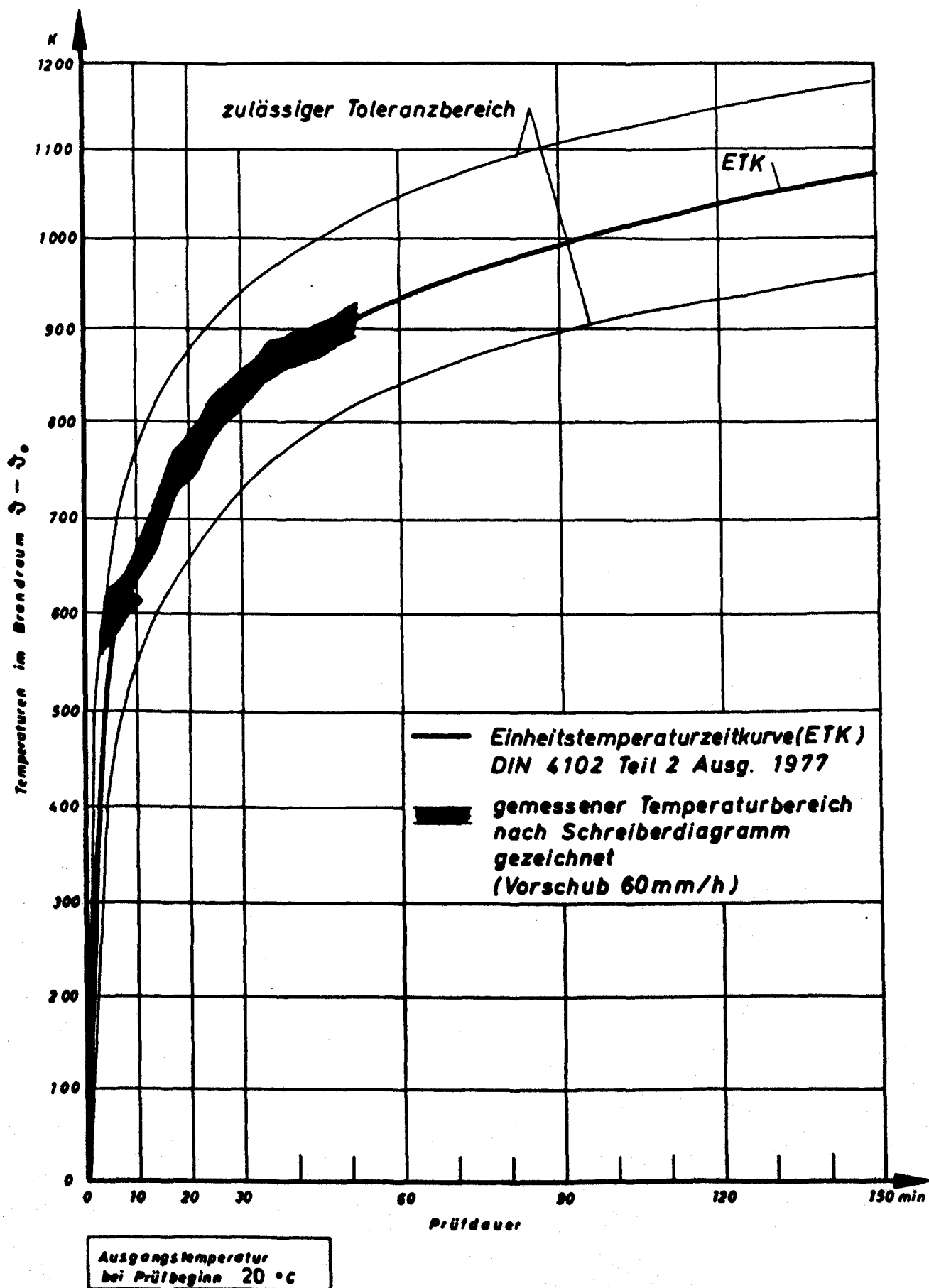
**Bild 6:** Abmessungen und Lage der Temperaturmeßstellen (Gußstummel mit Beton)



**Bild 7:** Brandraumtemperaturen (Gußstütze 1)

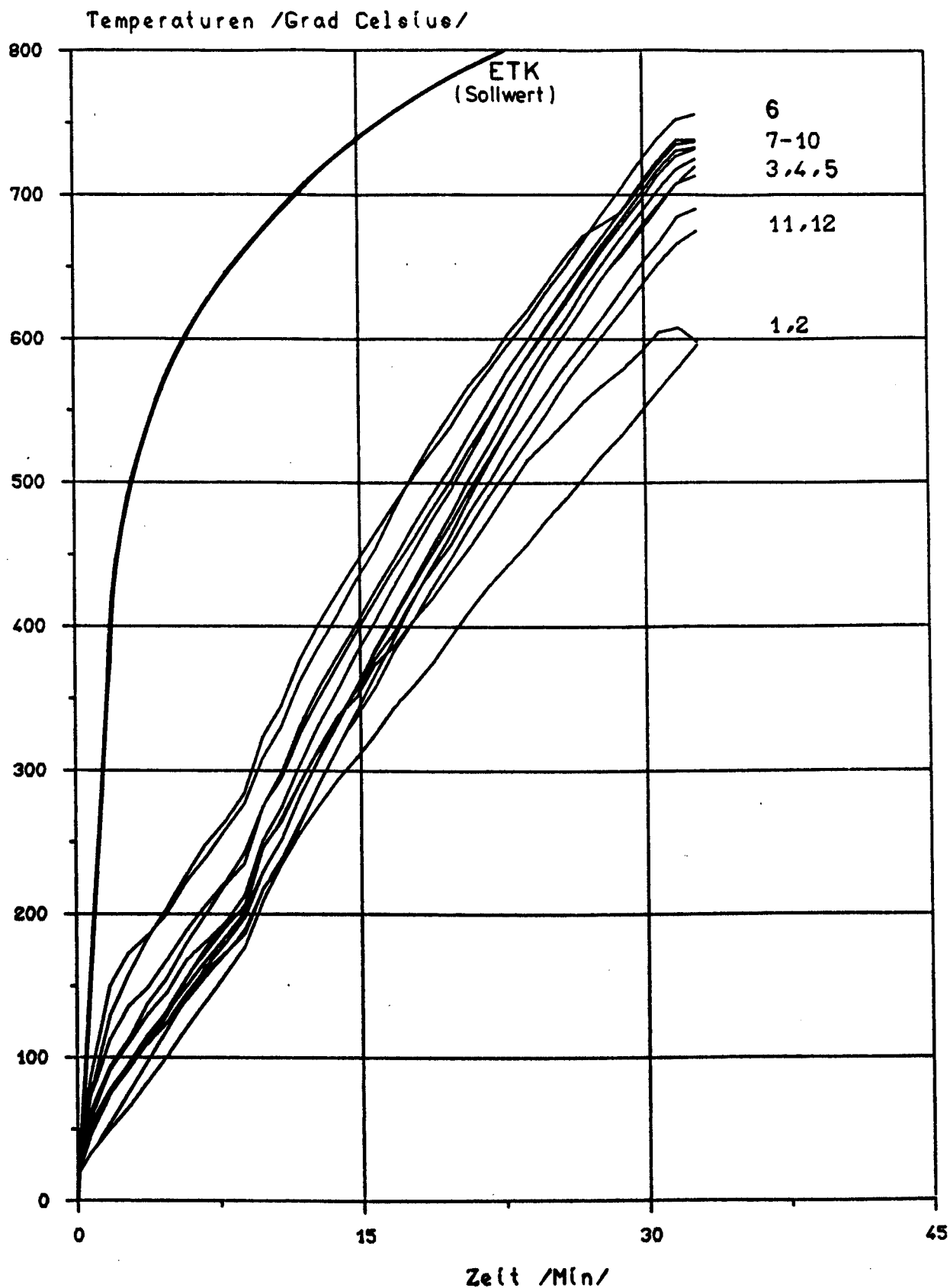


**Bild 8:** Brandraumtemperaturen (Gußstütze 2)

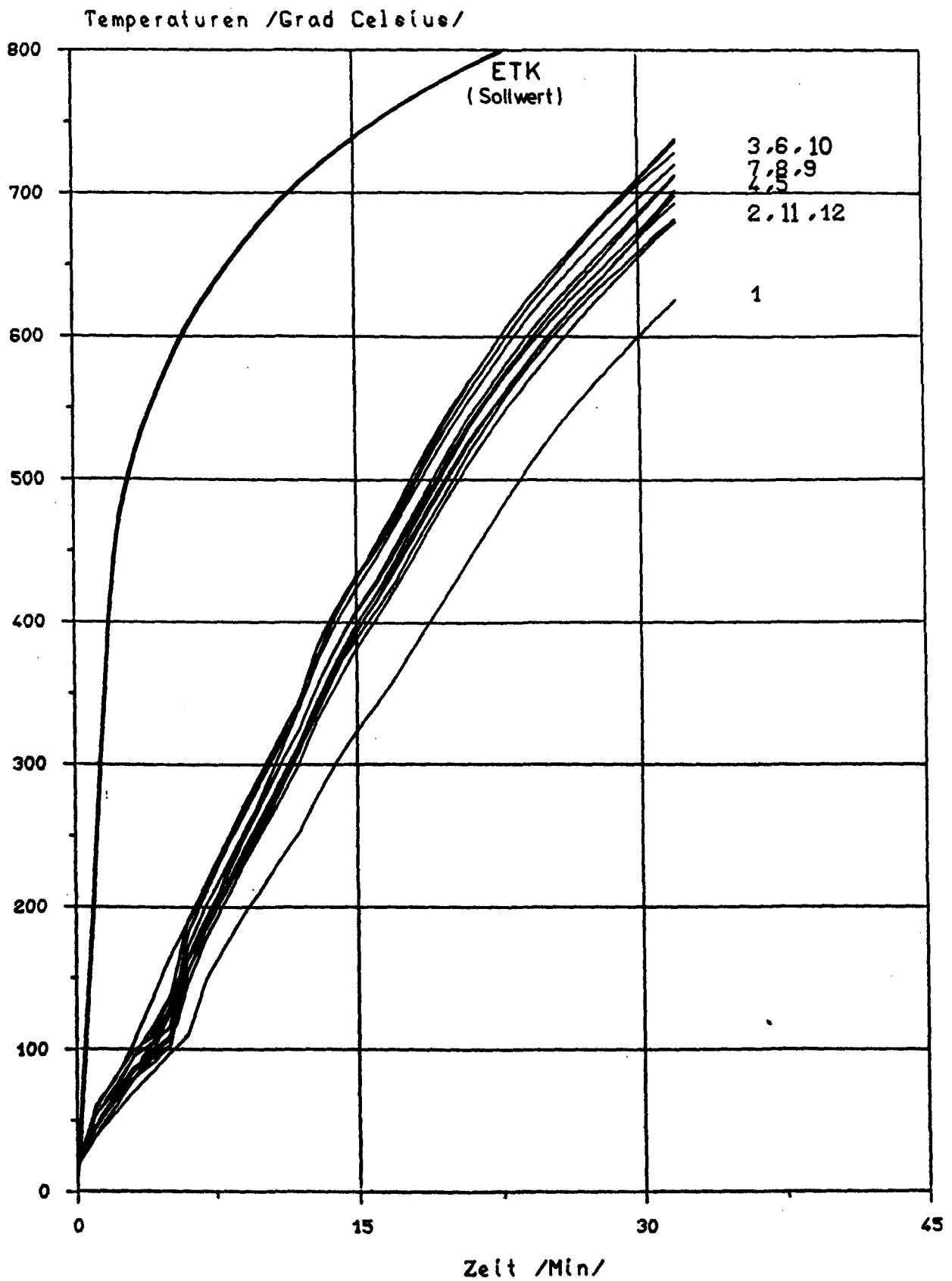


**Bild 9:** Brandraumtemperaturen (Gußstütze 3B)

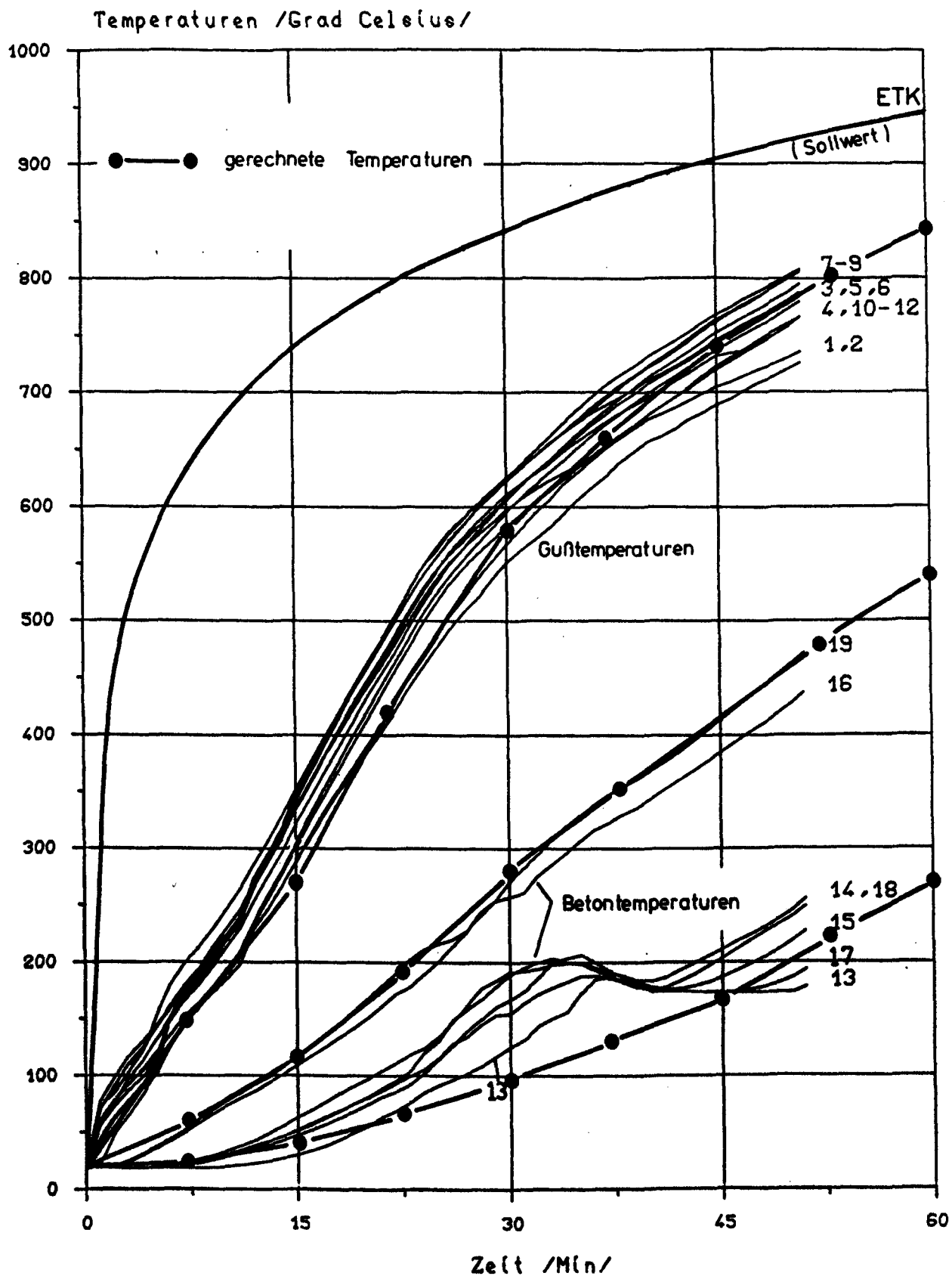




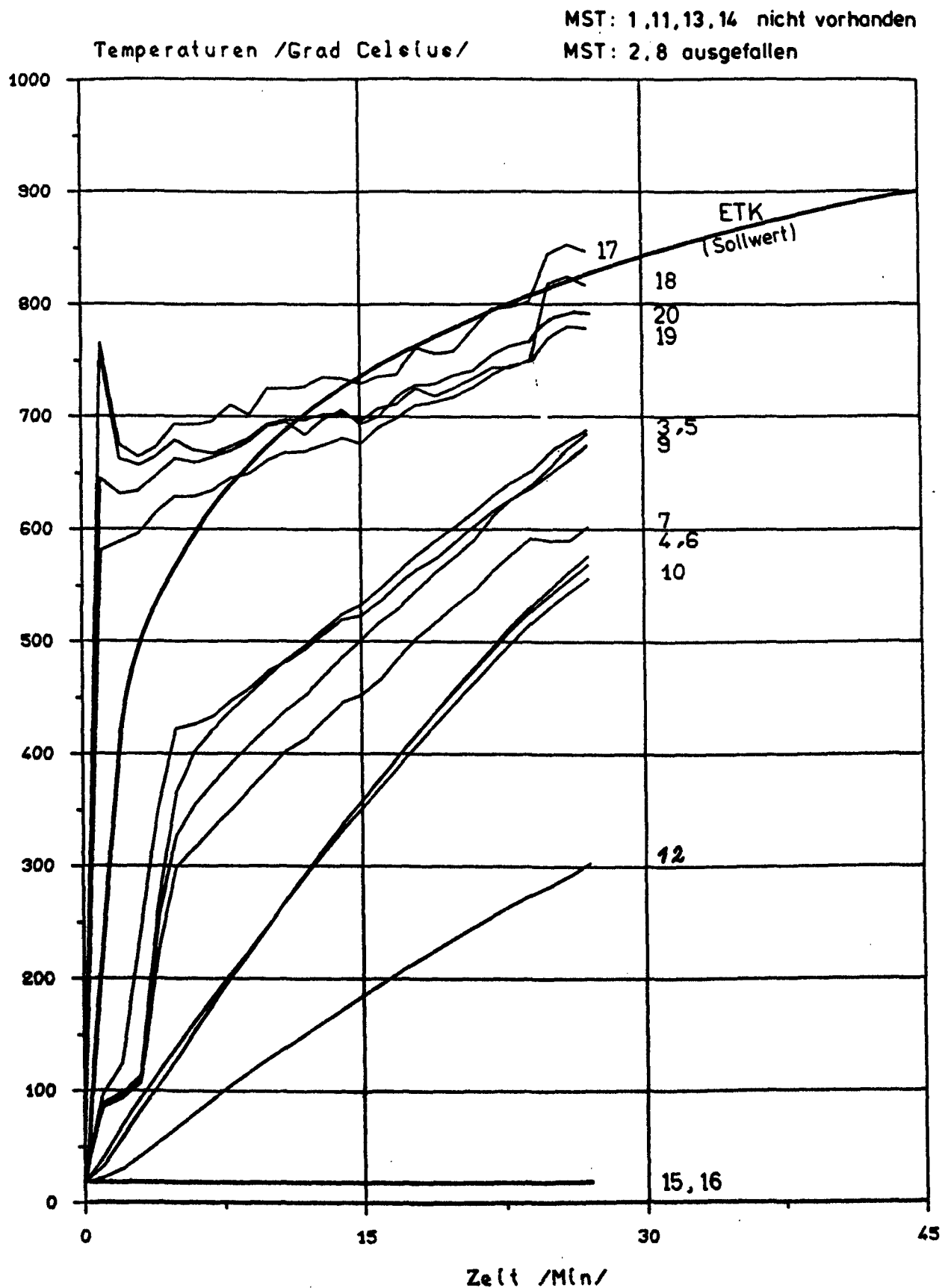
**Bild 10:** Bauteiltemperaturen (Gußstütze 1)



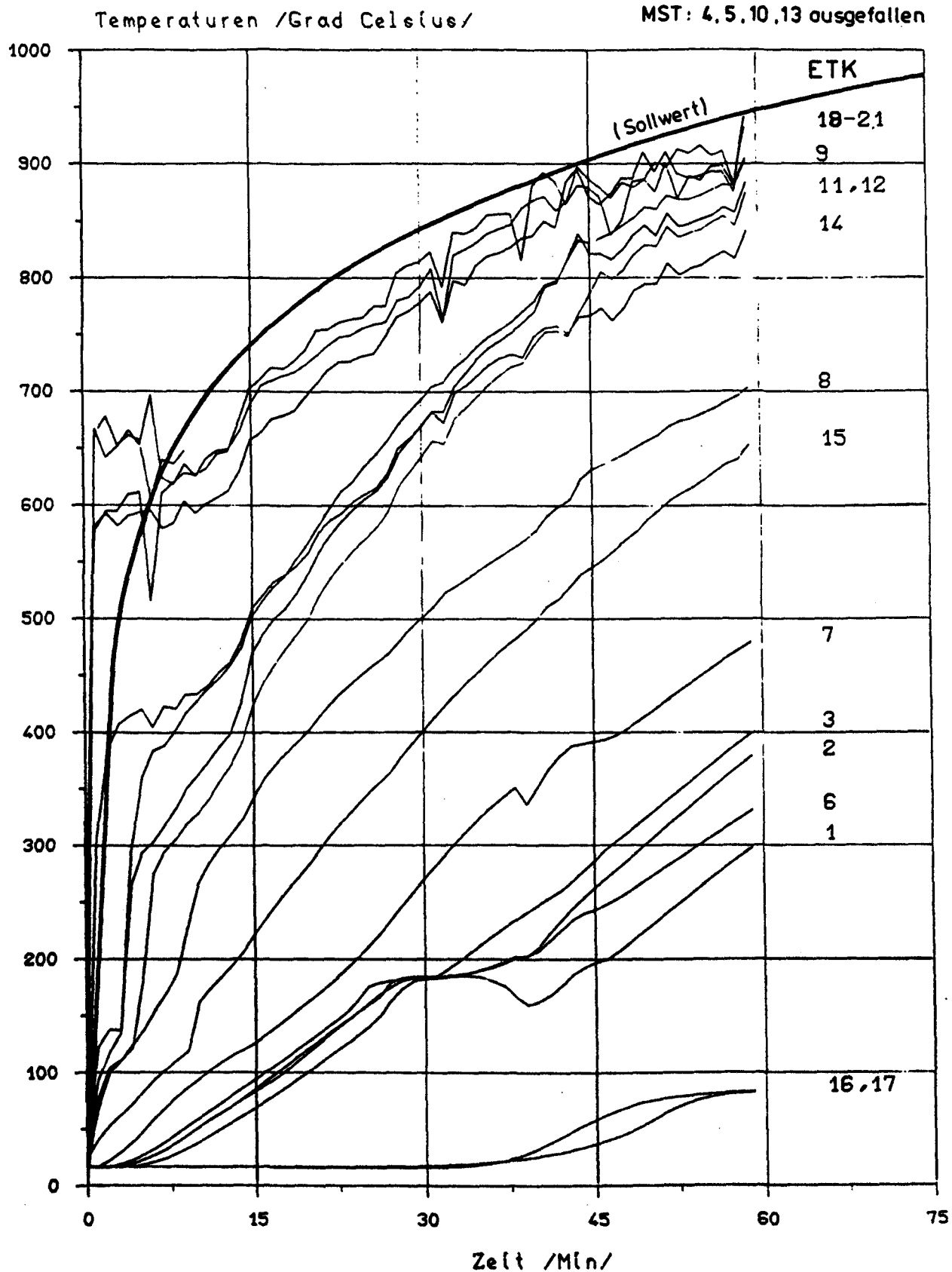
**Bild 11:** Bauteiltemperaturen (Gußstütze 2)



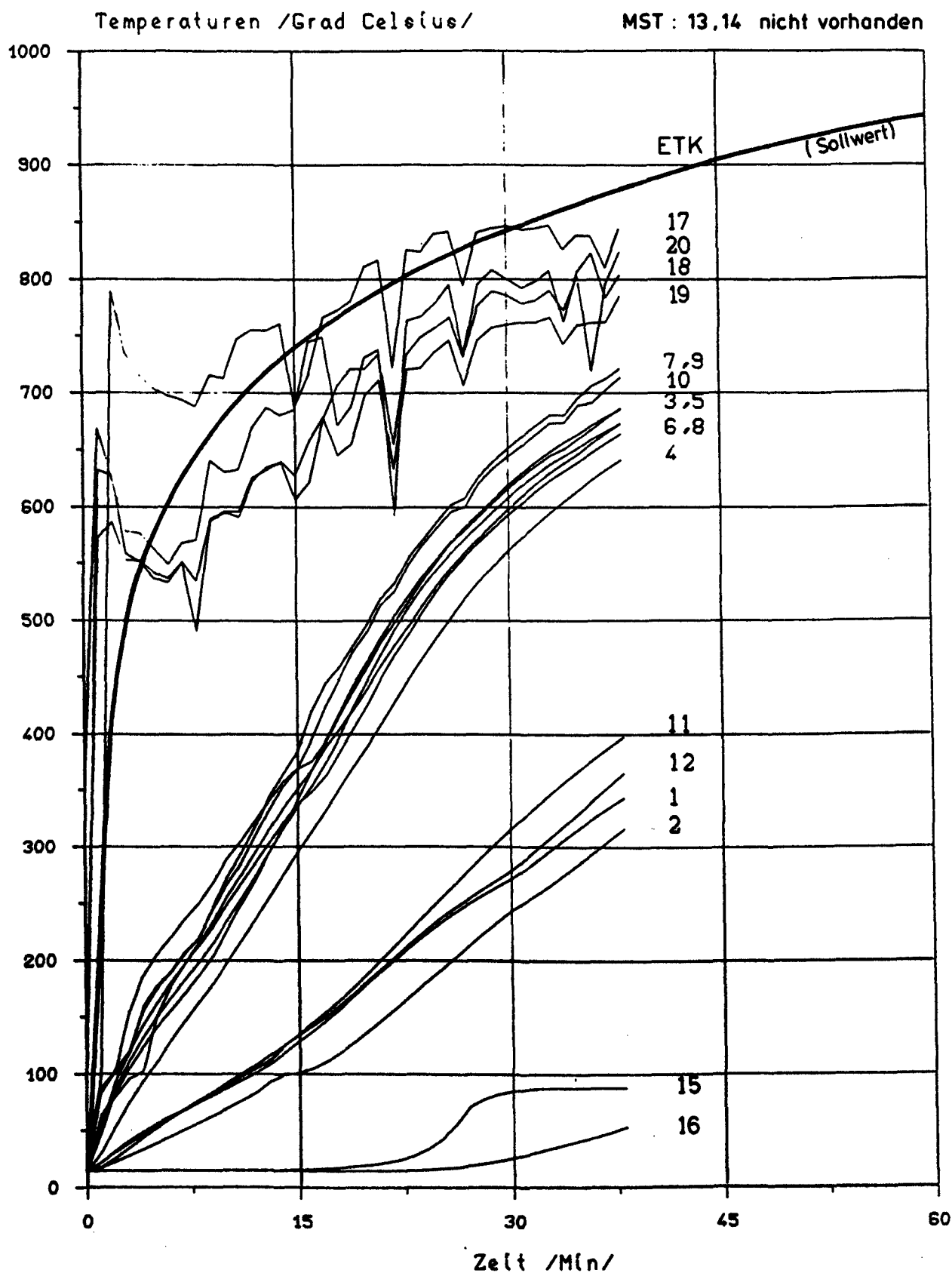
**Bild 12:** Bauteiltemperaturen (Gußstütze 3B) aus Versuch und Rechnung



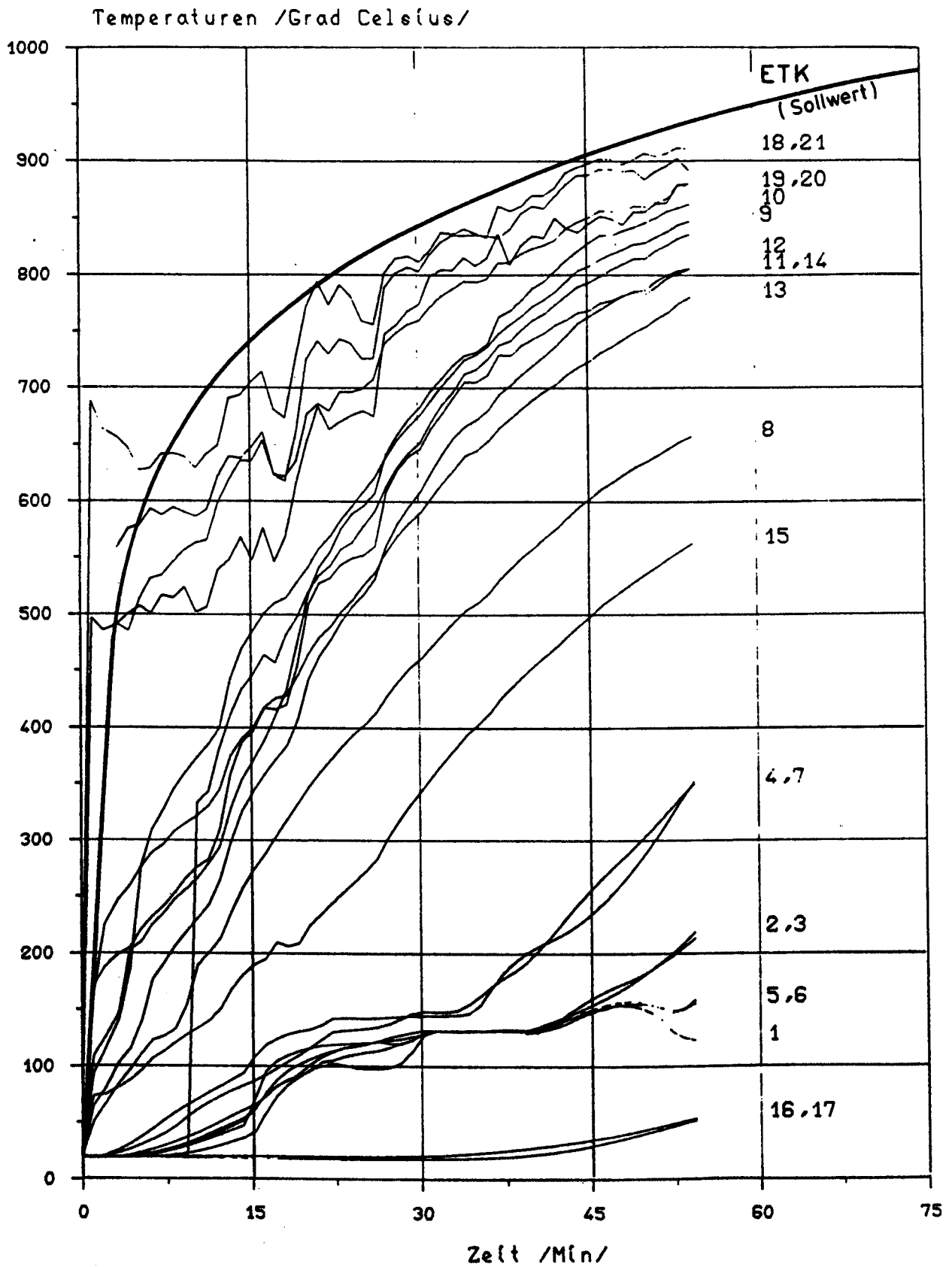
**Bild 13:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstummel 4)



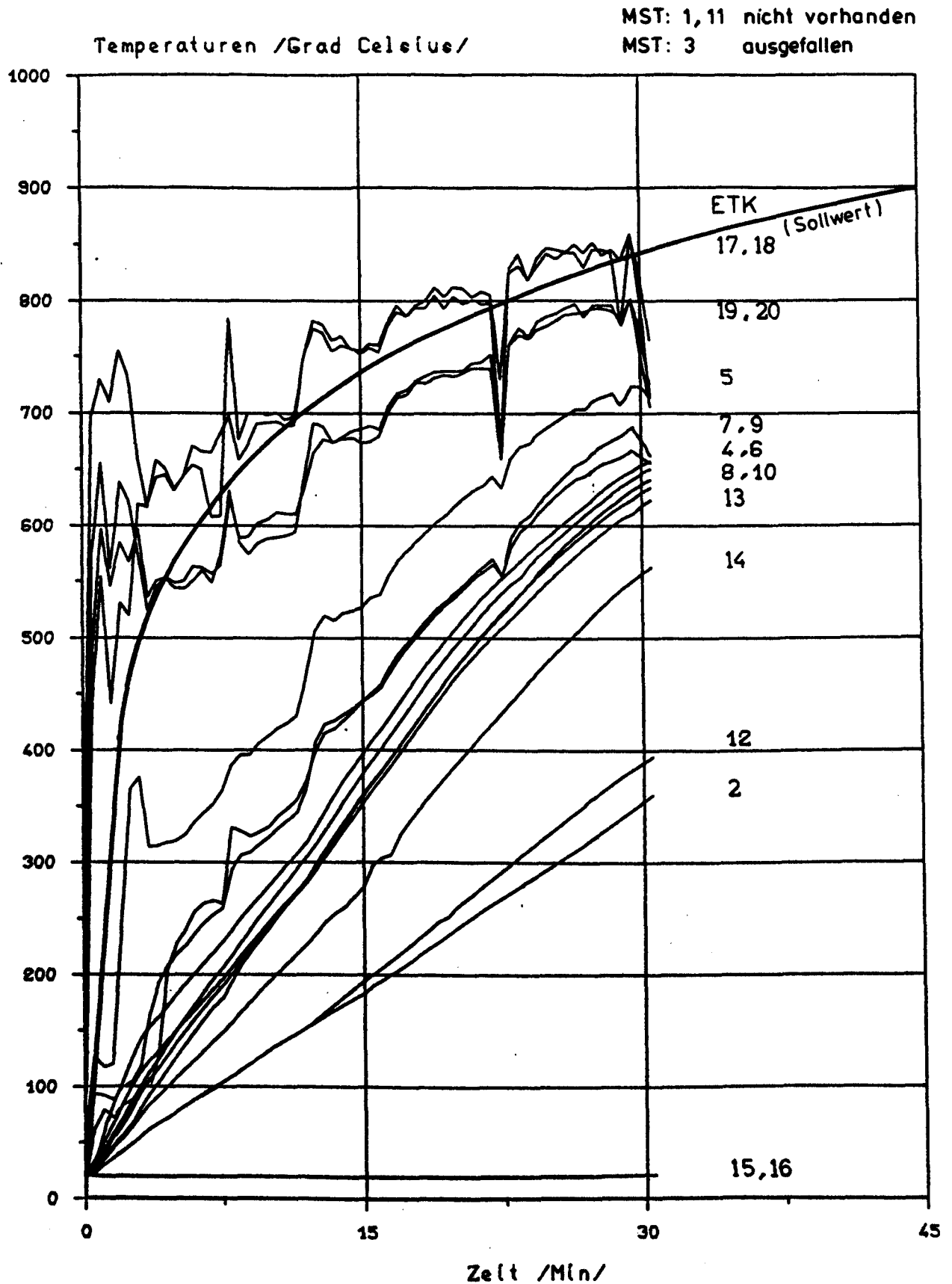
**Bild 14:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstunne 4B)



**Bild 15:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstempel 5)

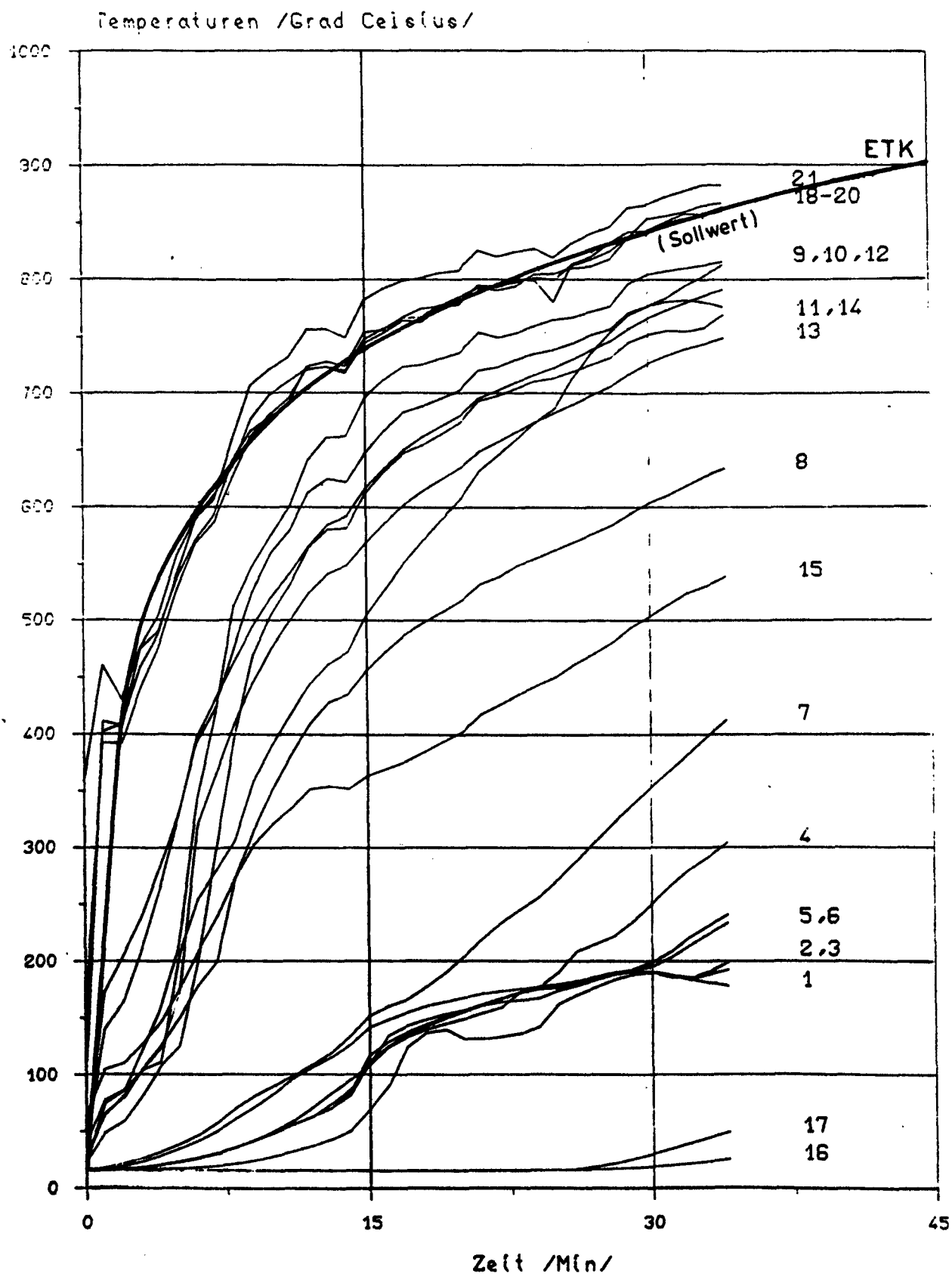


**Bild 16:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstummel 5B)

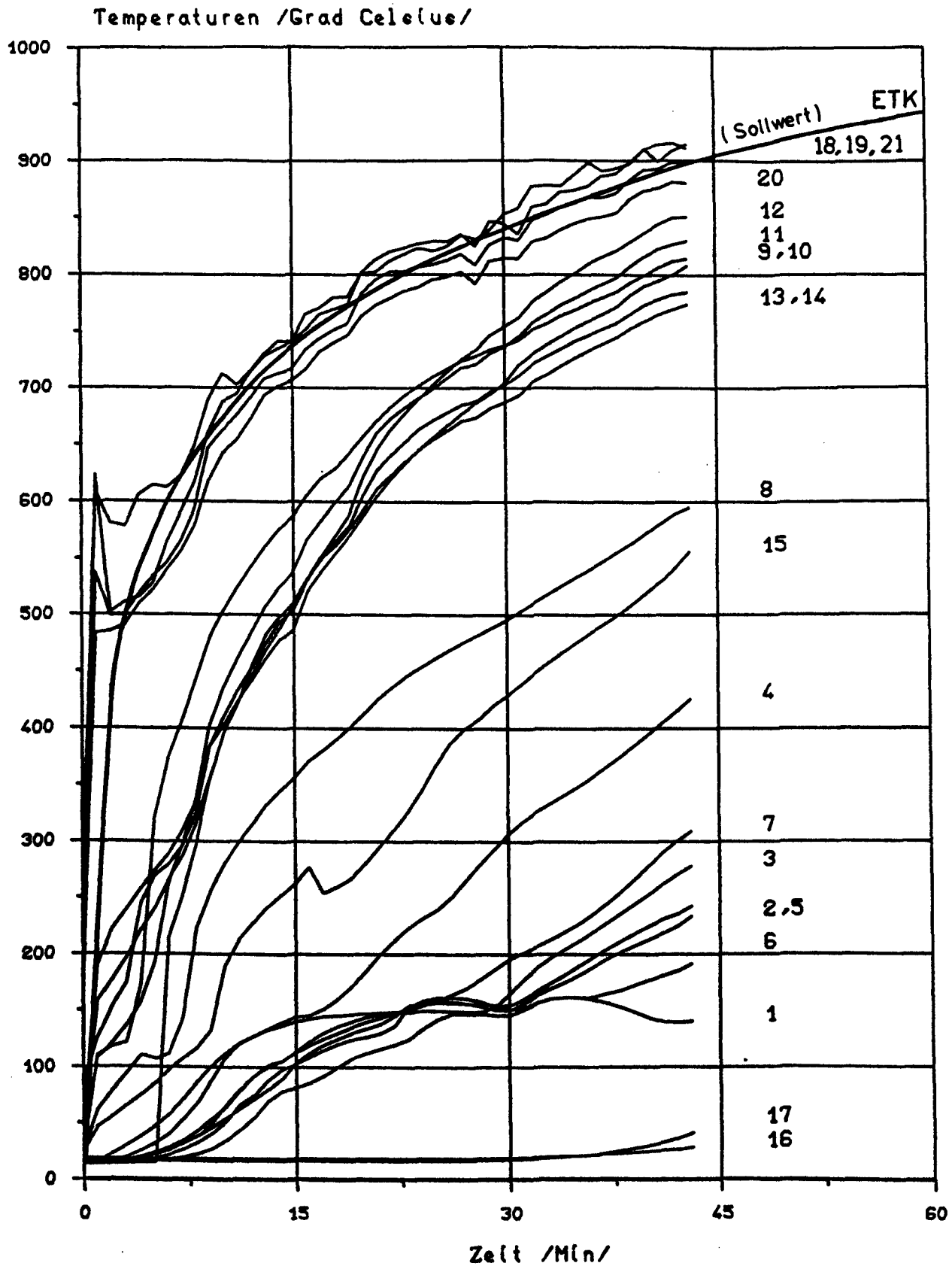


**Bild 17:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstunne 6)

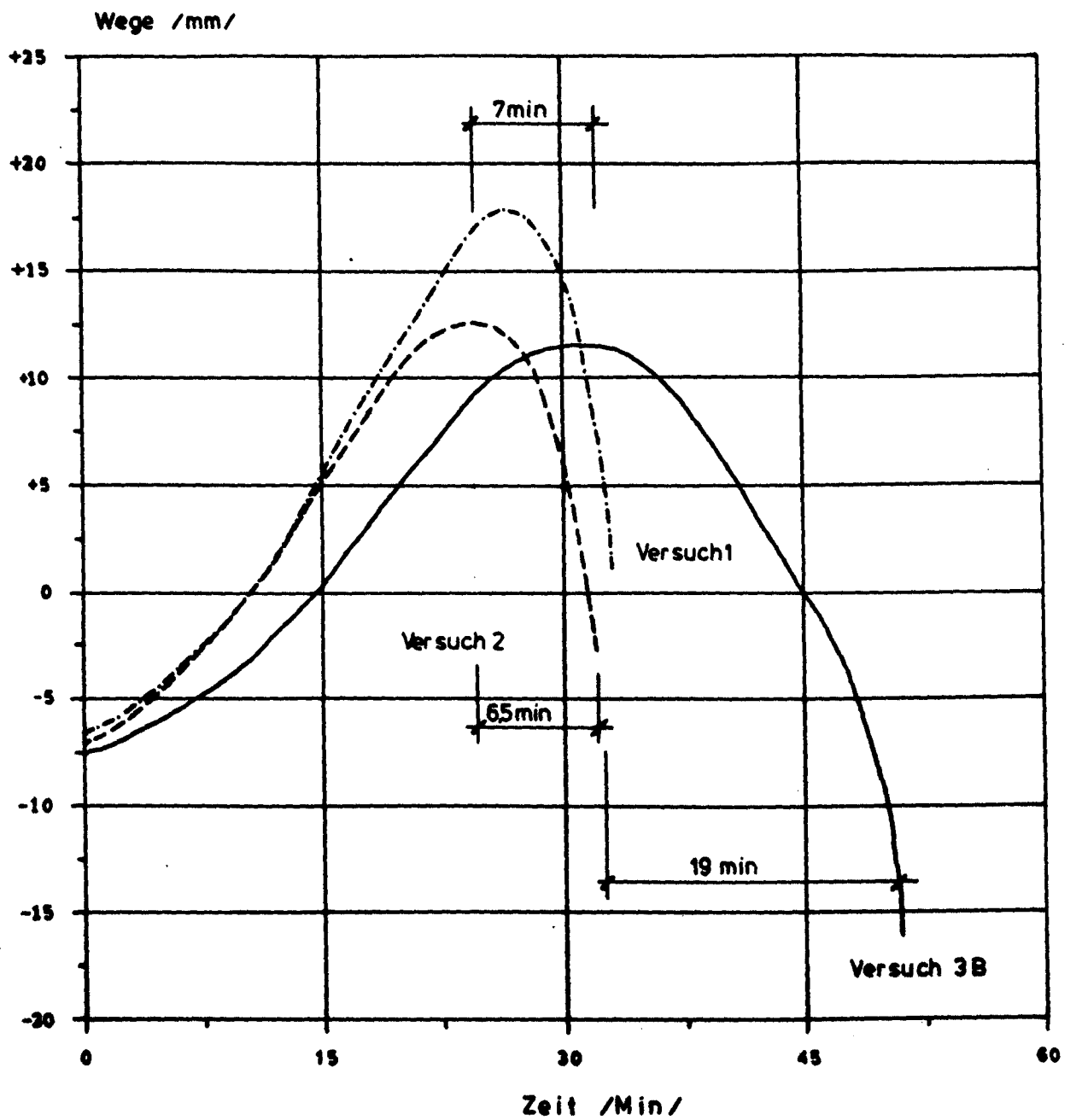




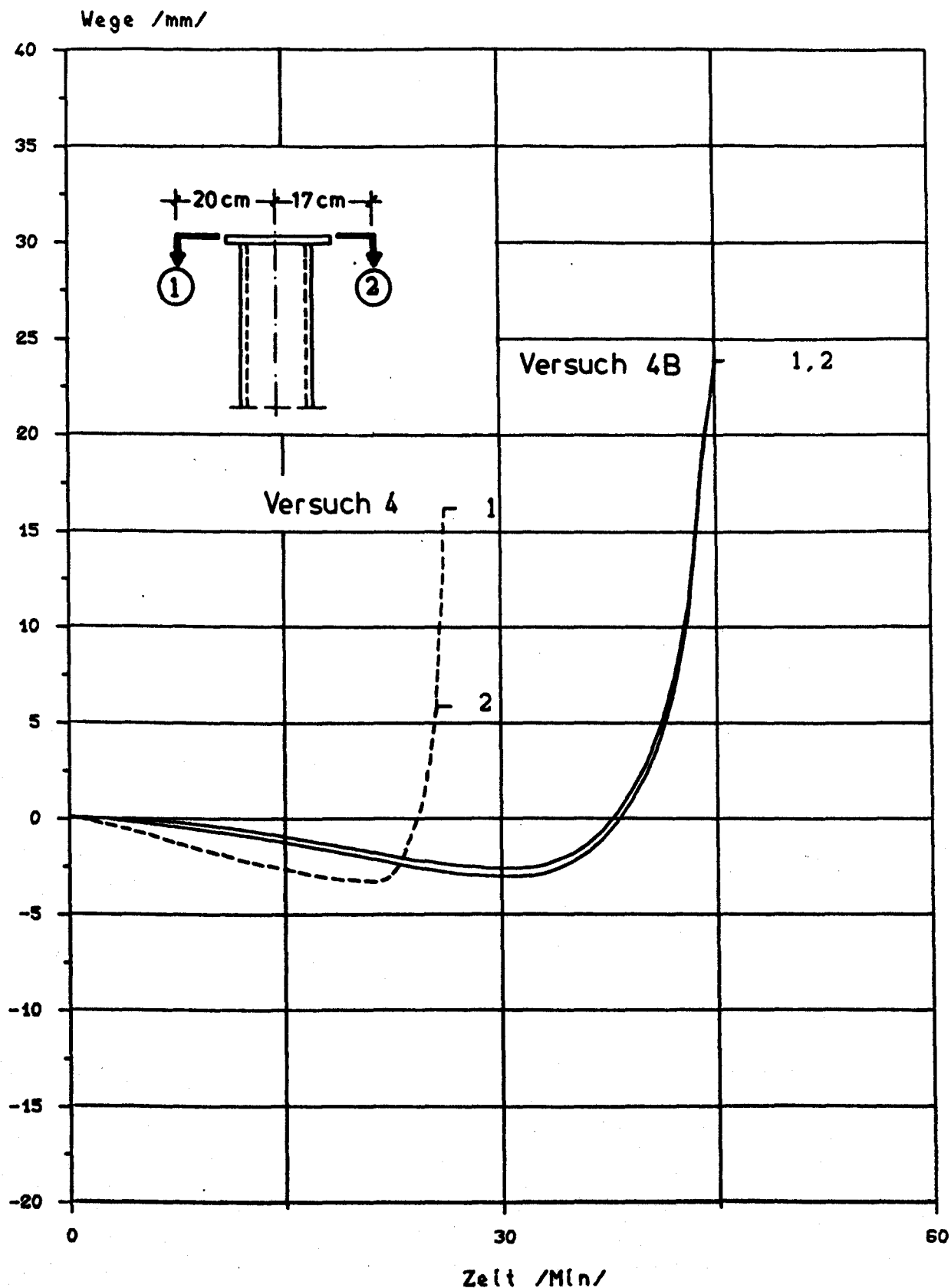
**Bild 18:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstummel 6B)



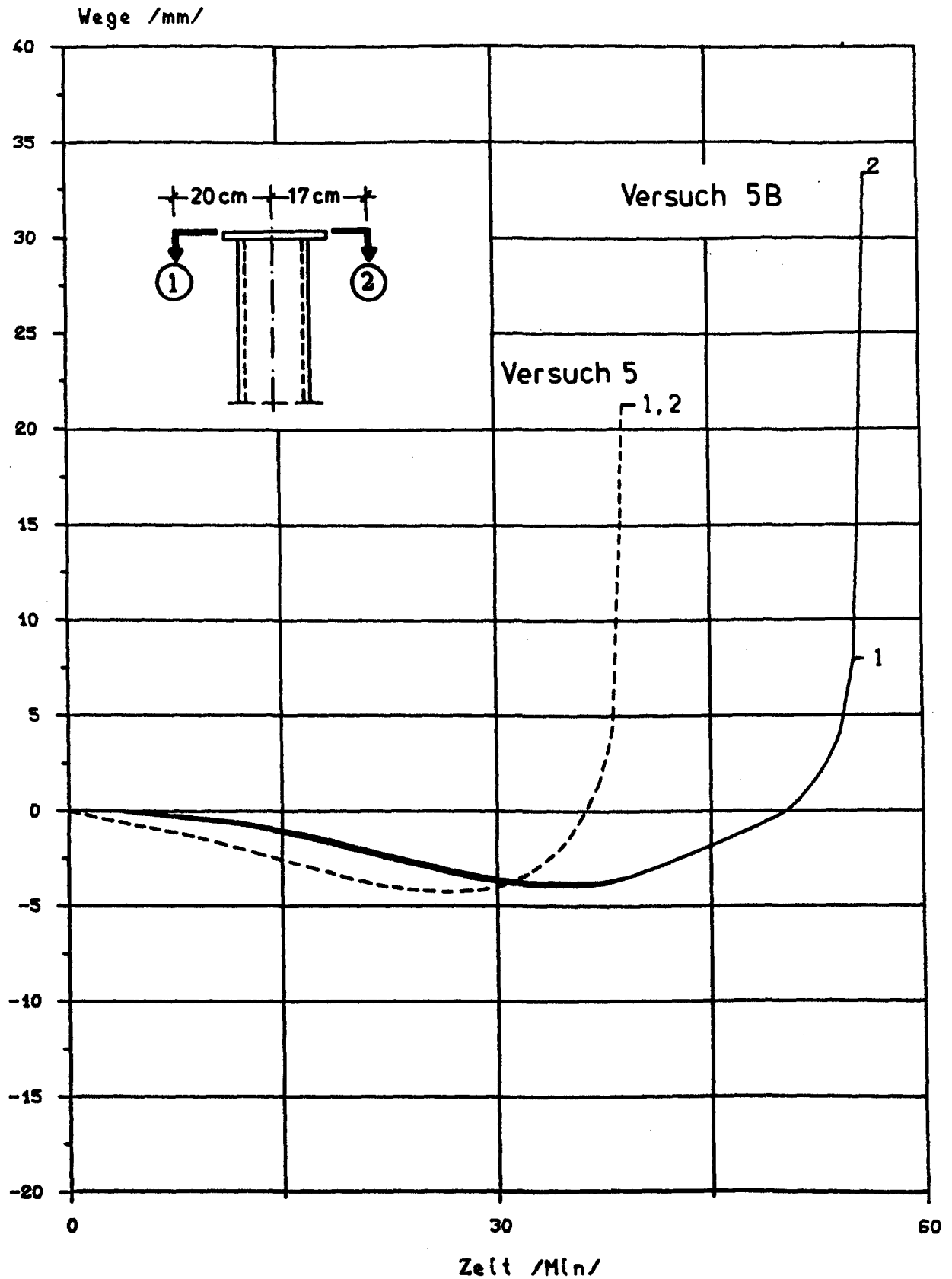
**Bild 19:** Brandraum- und Bauteiltemperaturen (Gußstummel 7B)



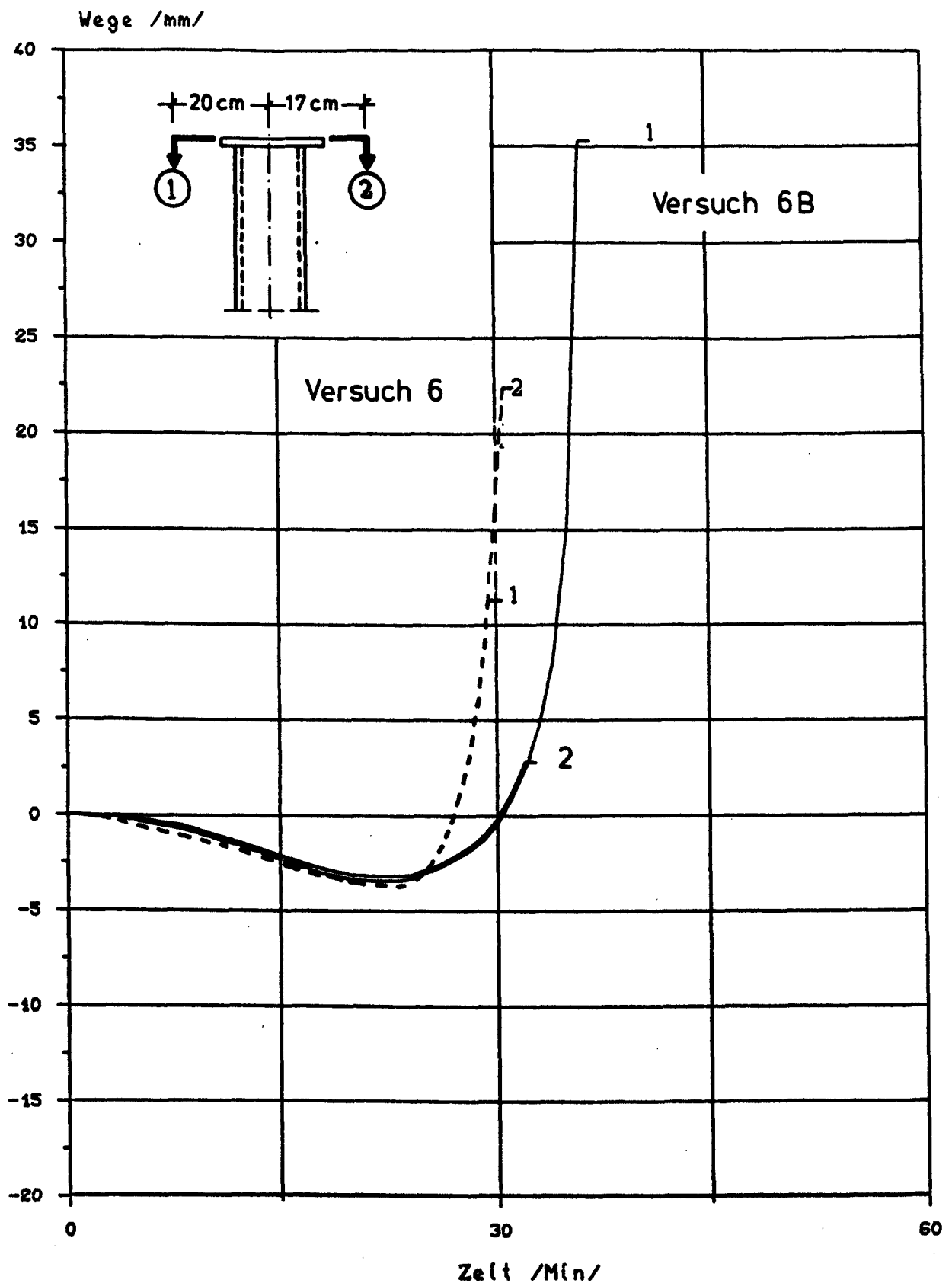
**Bild 20:** Längenänderung aus Last und Temperatur (Gußstützen 1, 2 und 3B)



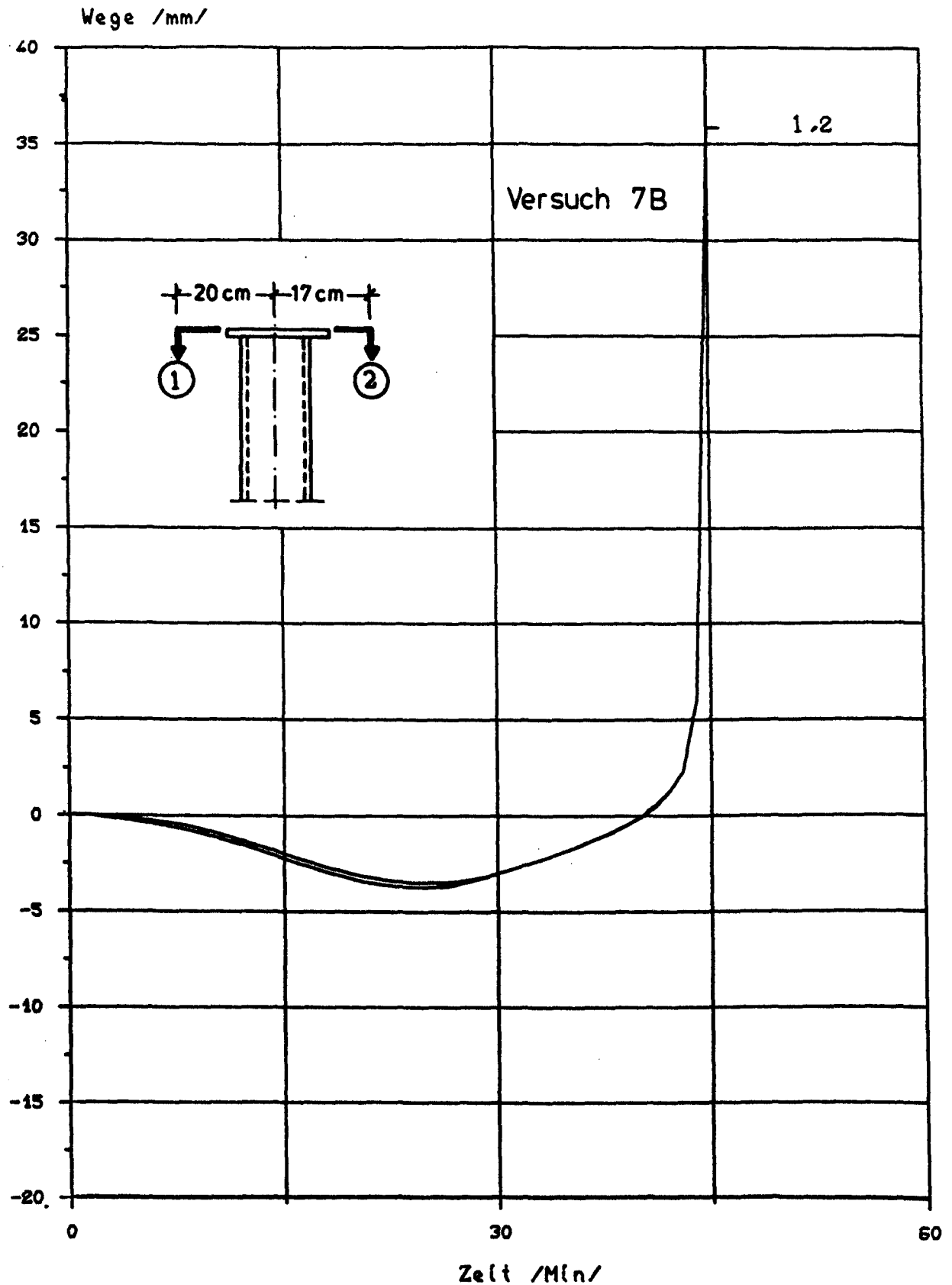
**Bild 21:** Längenänderung aus Last und Temperatur ohne Vorverformung aus Last (Gußstummel 4 und 4B)



**Bild 22:** Längenänderung aus Last und Temperatur ohne Vorverformung aus Last (Gußstummel 5 und 5B)



**Bild 23:** Längenänderung aus Last und Temperatur ohne Vorverformung aus Last (Gußstempel 6 und 6B)



**Bild 24:** Längenänderung aus Last und Temperatur ohne Vorverformung aus Last (Gußstummel 7B)

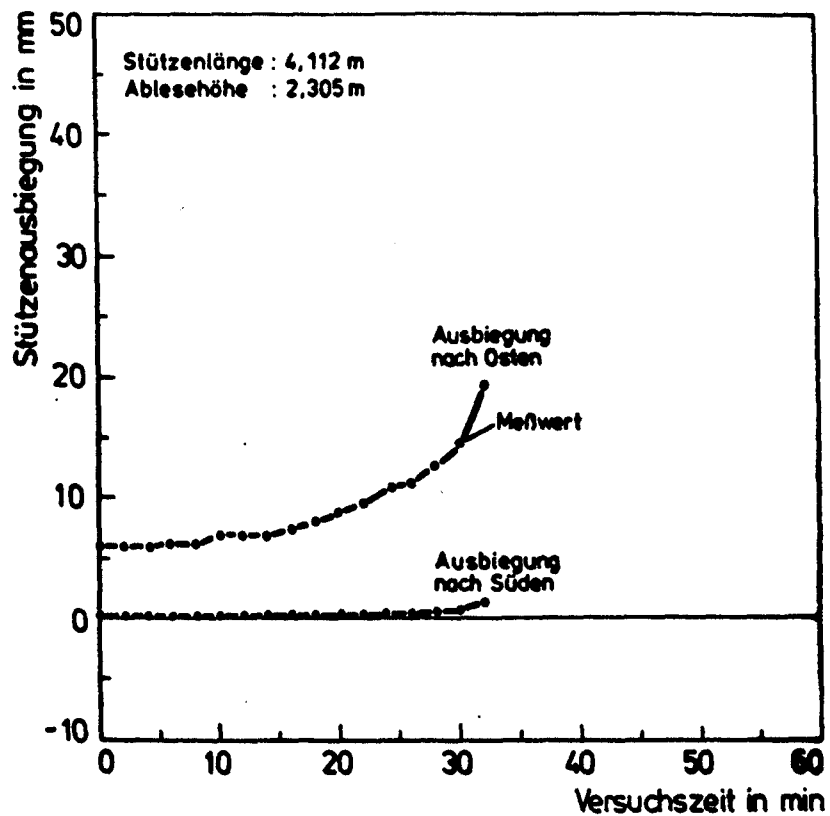


Bild 25: Stützensausbiegungen (Gußstütze 1)

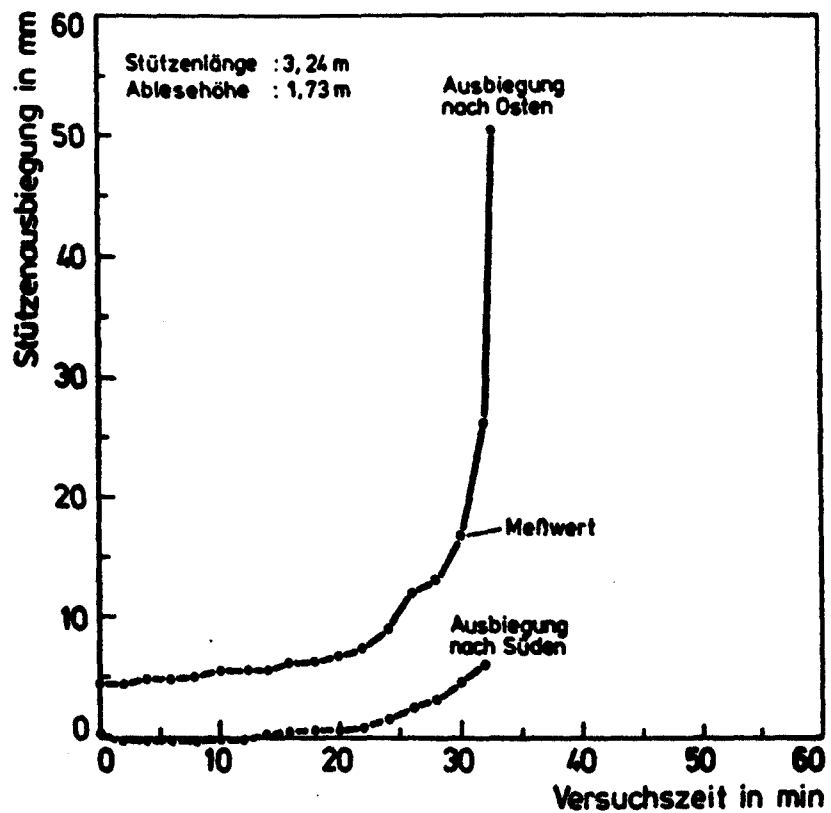


Bild 26: Stützensausbiegungen (Gußstütze 2)



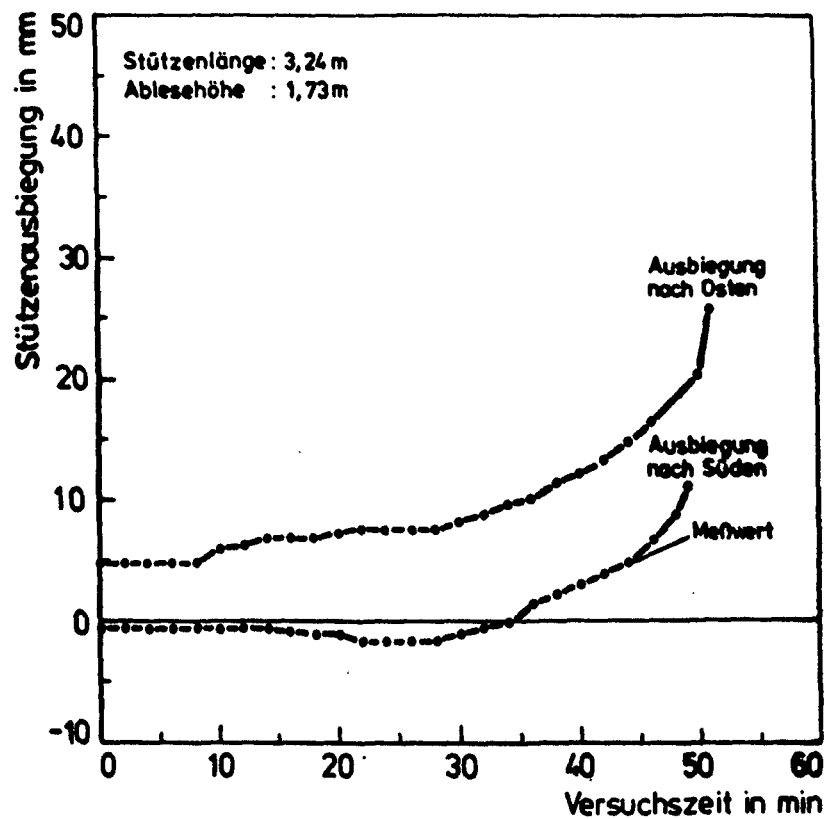


Bild 27: Stützensausbiegungen (Gußstütze 3B)

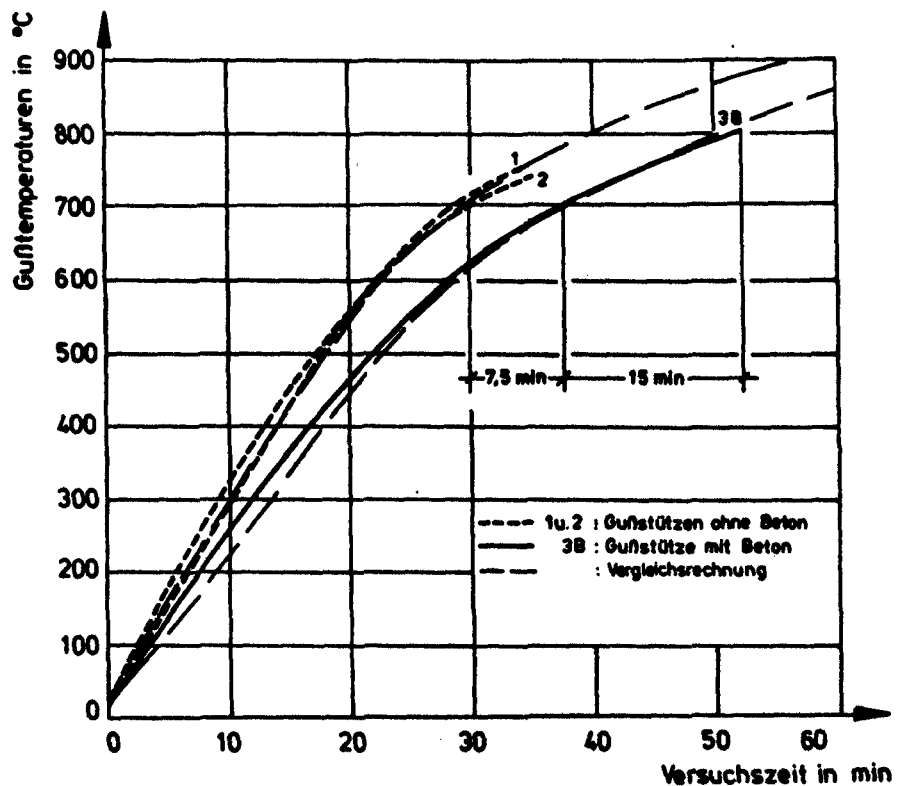
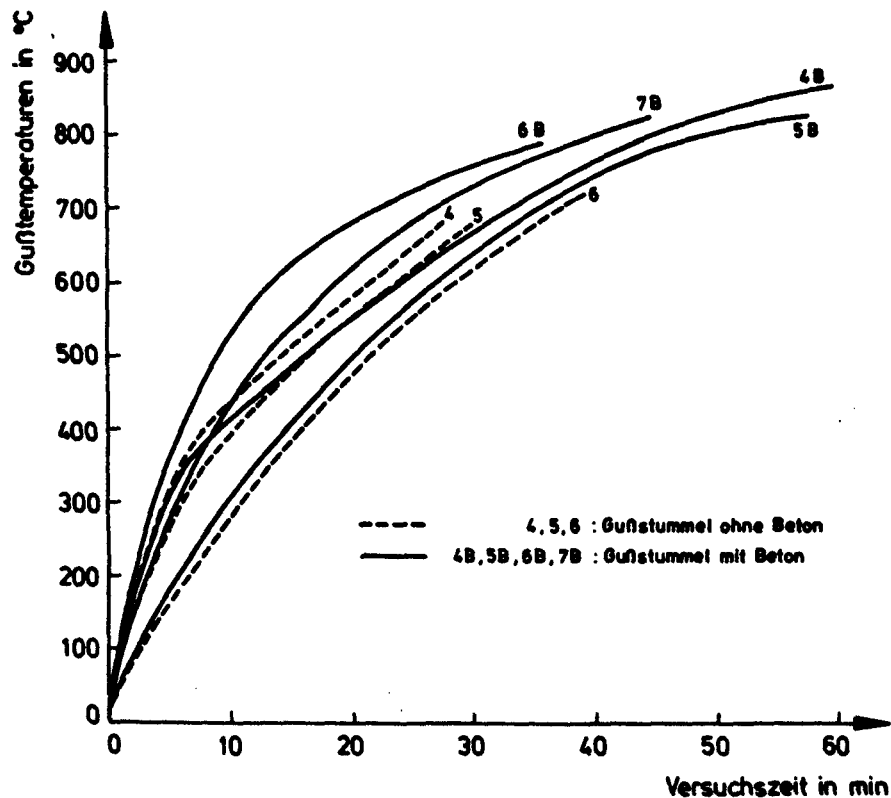
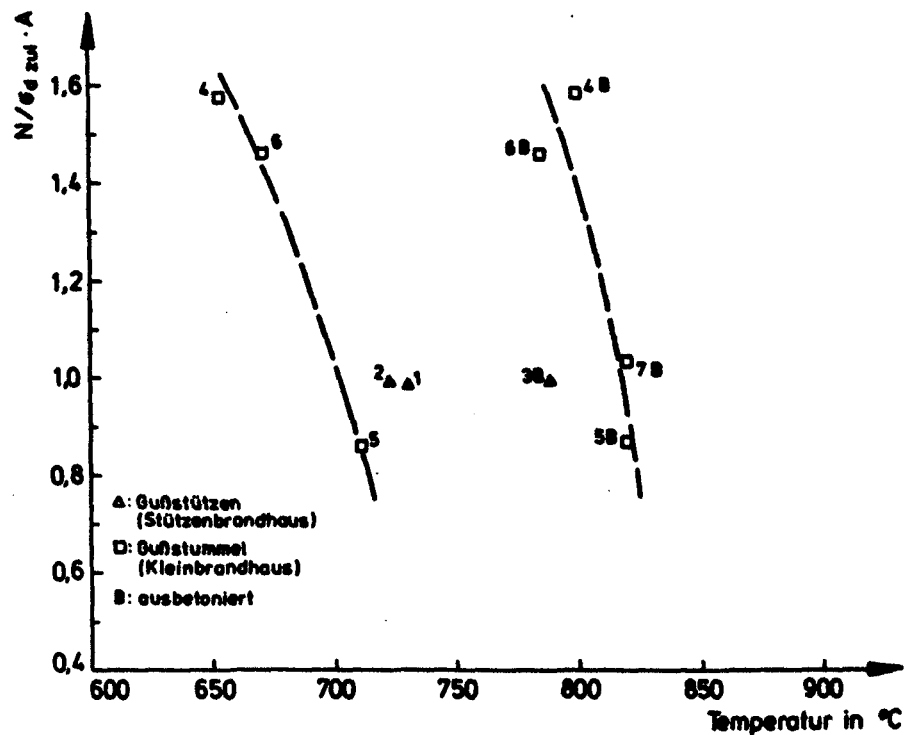


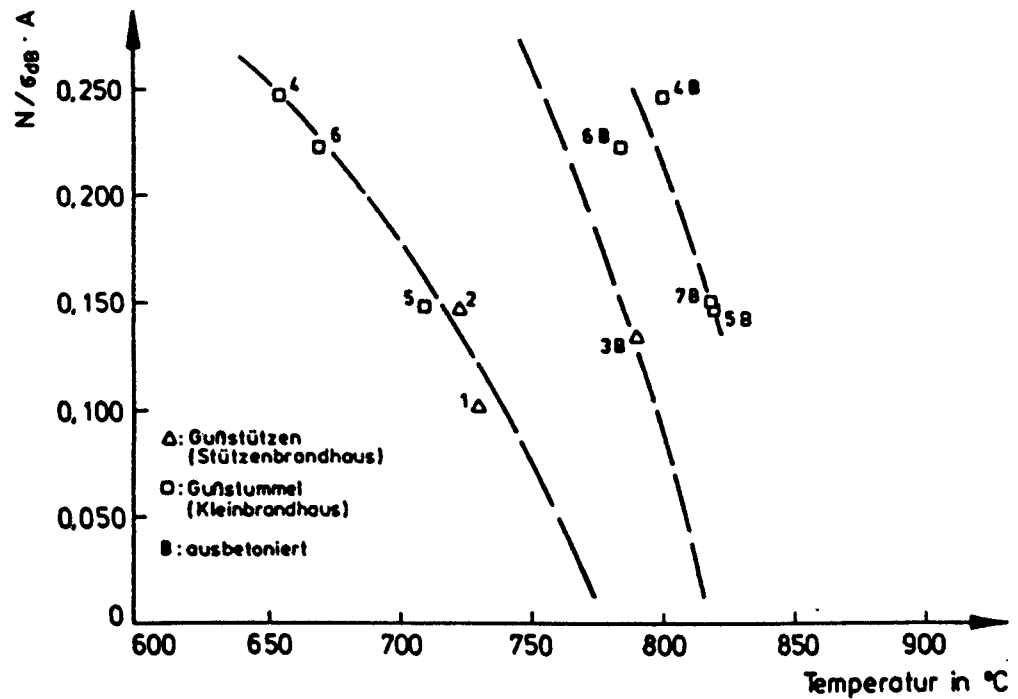
Bild 28: Gemittelte Bauteiltemperaturen in halber Stützenhöhe (Gußstützen 1, 2 und 3B) aus Versuch und Rechnung



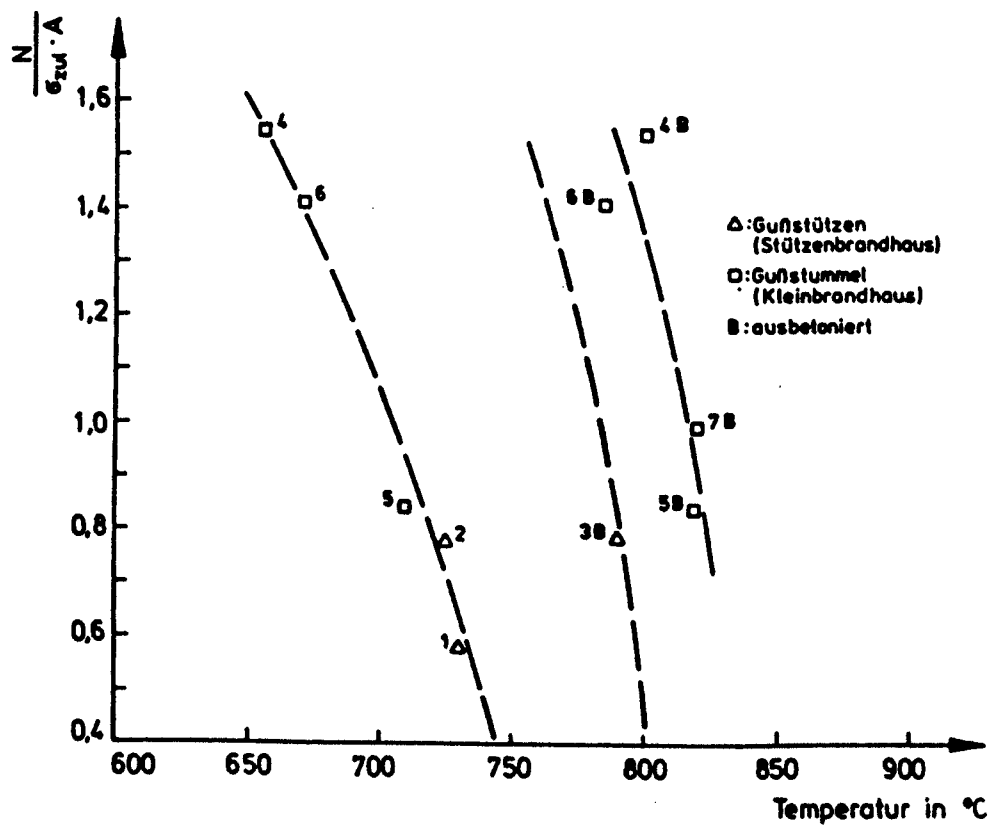
**Bild 29:** Gemittelte Bauteiltemperaturen in halber Stummelhöhe (Gußstummel 4 bis 7B)



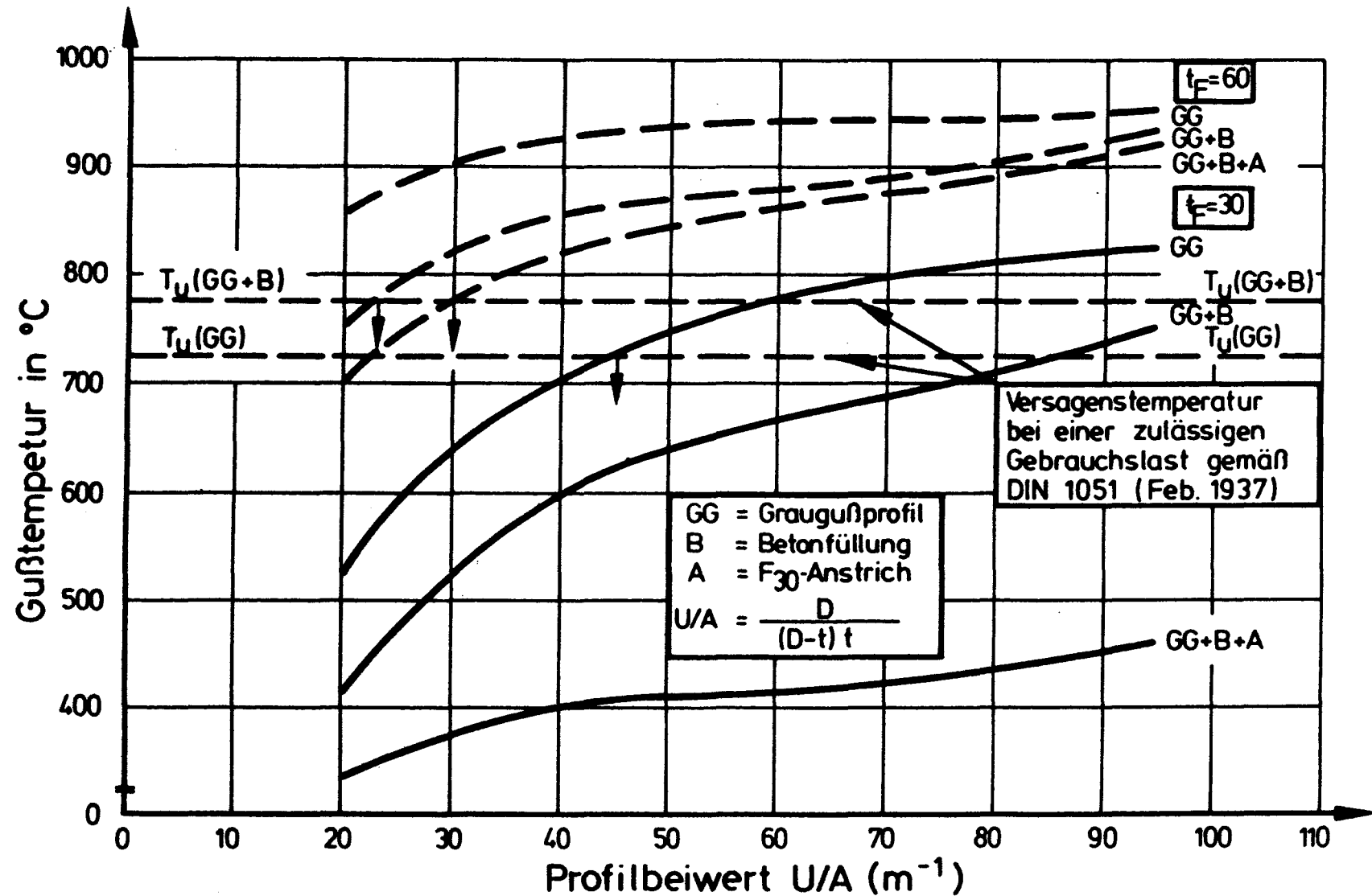
**Bild 30:** Versagenstemperaturen in Abhängigkeit von der auf die schlankheitsbedingte Gebrauchslast (DIN 1051) bezogenen Versuchslast



**Bild 31:** Versagenstemperaturen in Abhängigkeit von der auf die rechnerische Quetschlast bezogenen Versuchslast



**Bild 32:** Versagenstemperaturen in Abhängigkeit von der auf die zulässige Querschnittsbeanspruchung (DIN 1051) bezogenen Versuchslast



**Bild 33:** Oberflächentemperaturen von Gußhohlprofilen in Abhängigkeit vom Profilwert  $U/A$  für verschiedene Brandschutzmaßnahmen

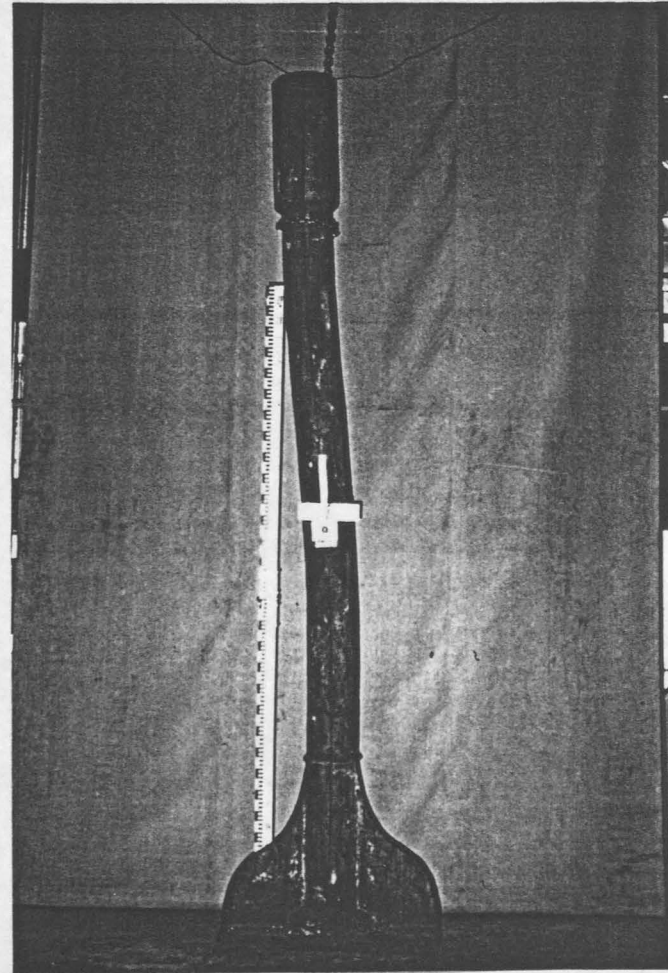
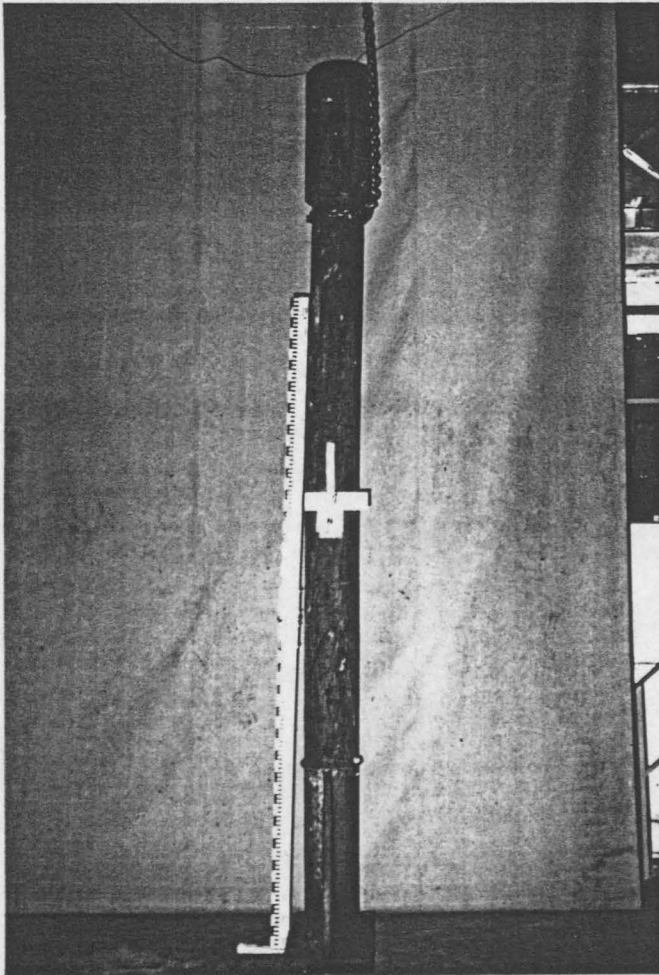


Foto 1 und 2: Gußstütze 1 nach dem Brandversuch (Nord- und Ostseite)

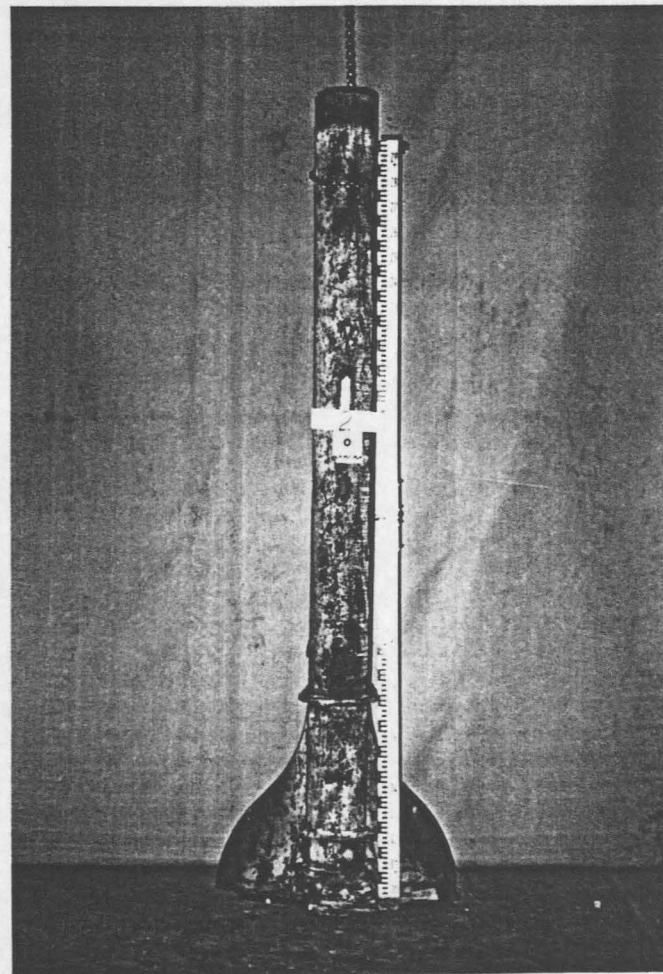
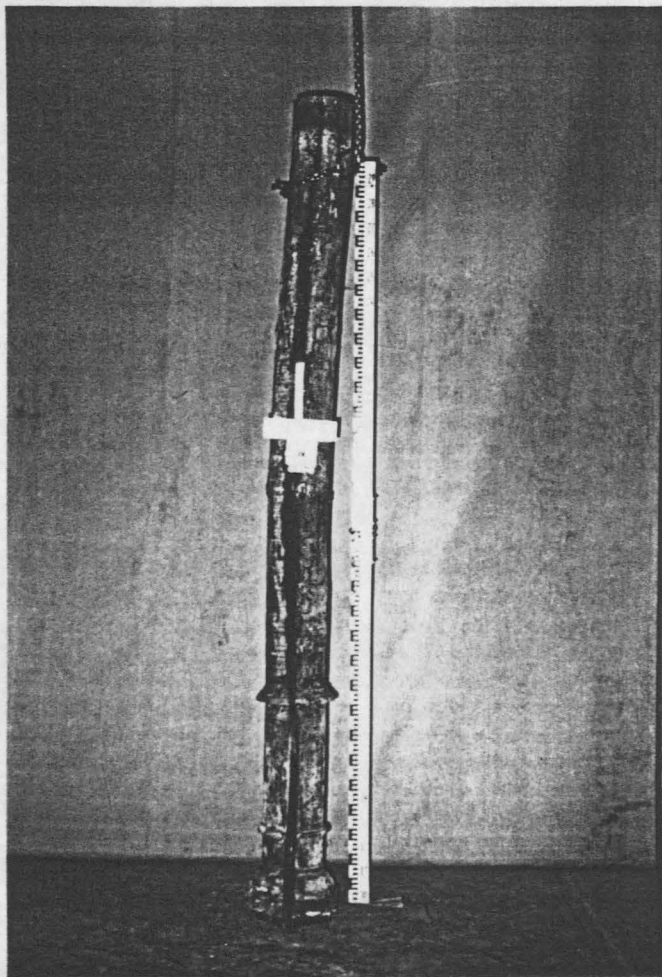


Foto 3 und 4: Gußstütze 2 nach dem Brandversuch (Nord- und Ostseite)



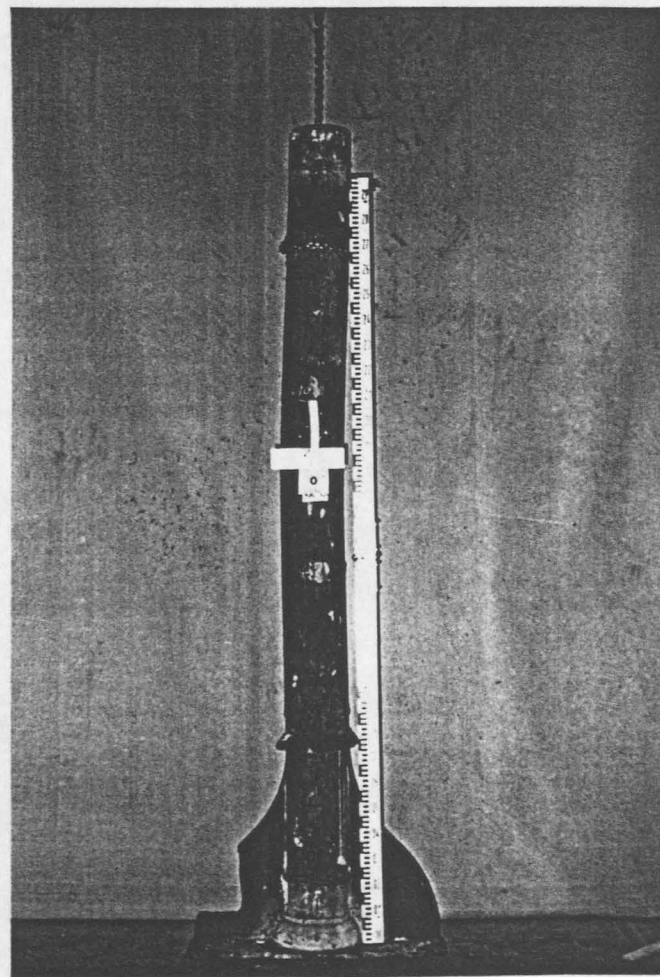
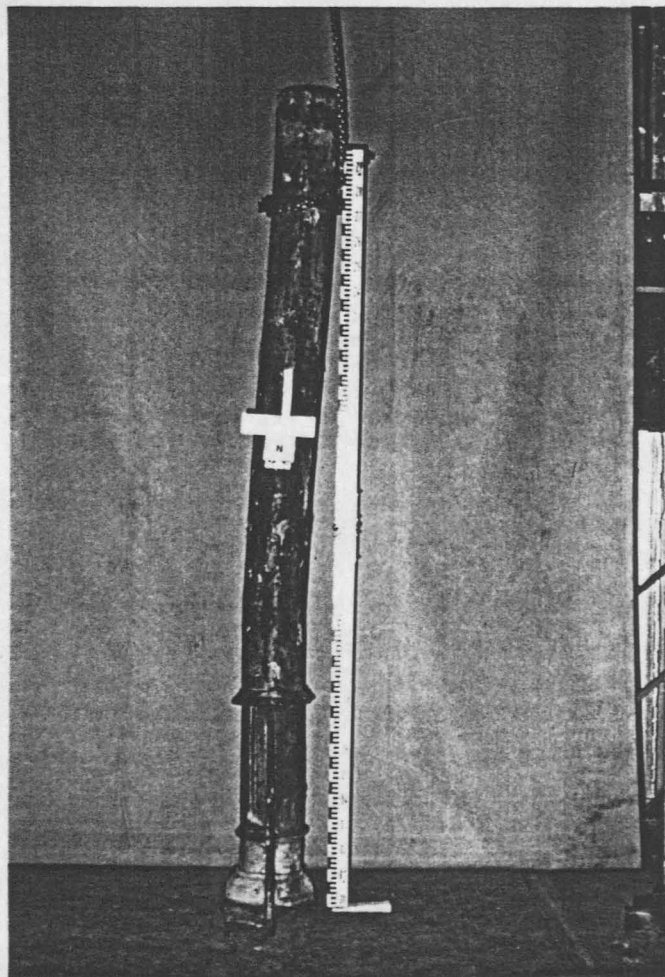


Foto 5 und 6: Gußstütze 3B nach dem Brandversuch (Nord- und Ostseite)

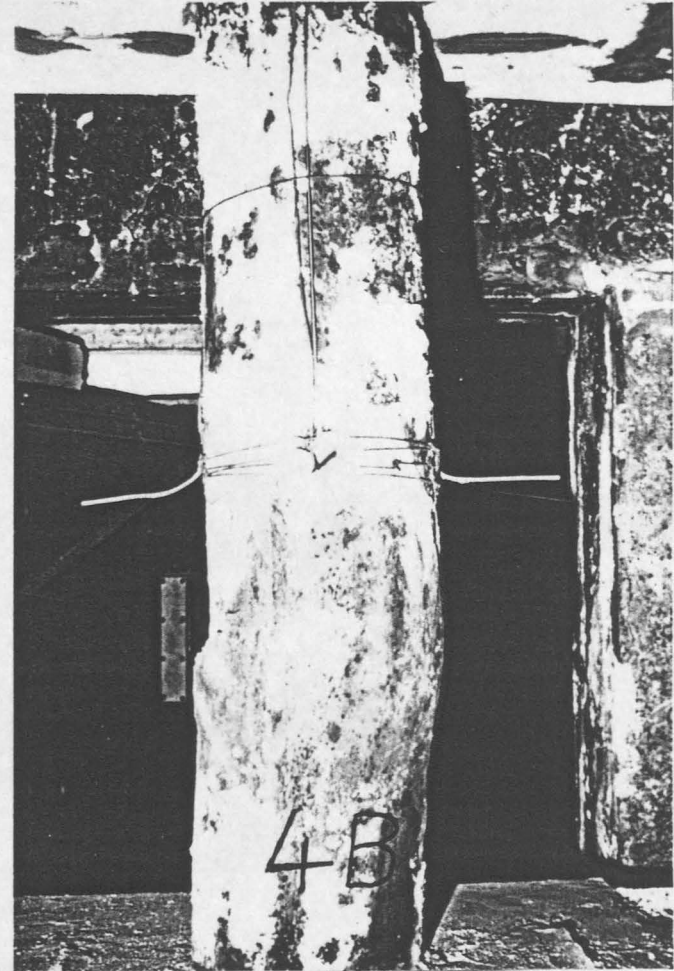
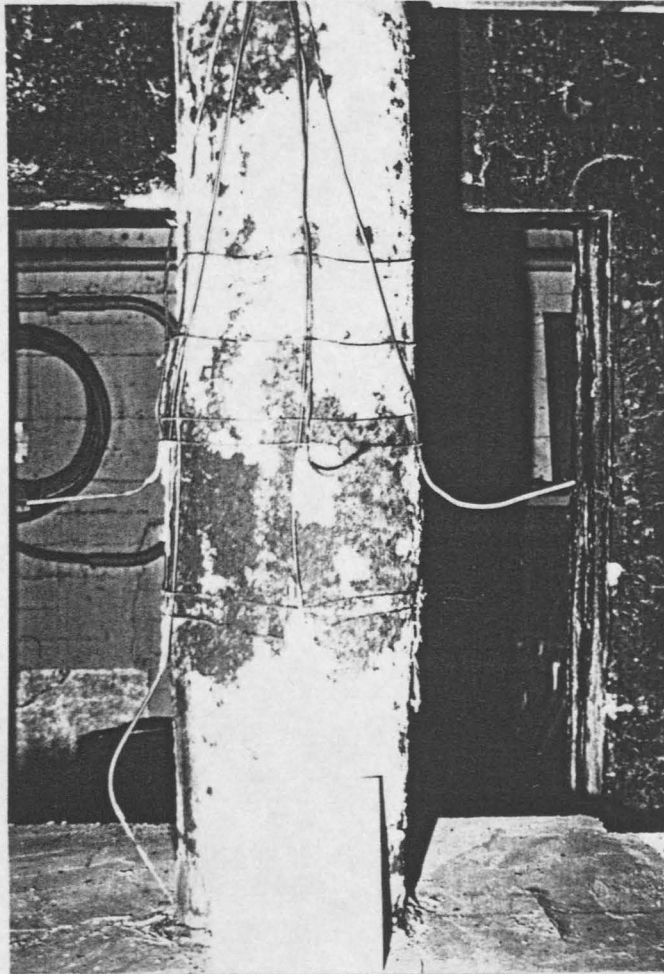


Foto 7 und 8: Gußstumme 4 und 4B nach dem Brandversuch



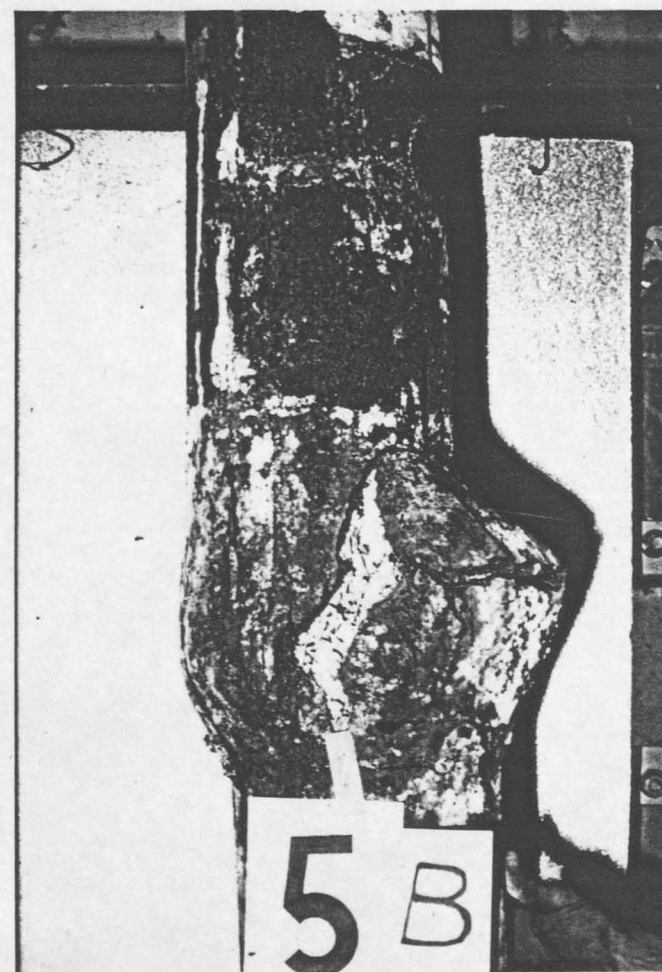
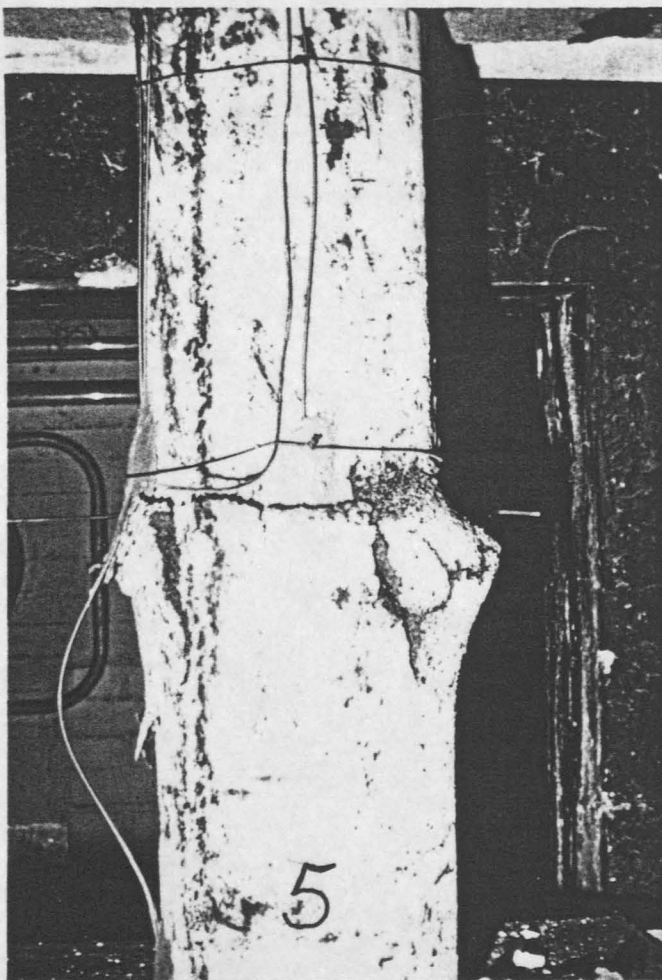


Foto 9 und 10: Gußstumme1 5 und 5B nach dem Brandversuch

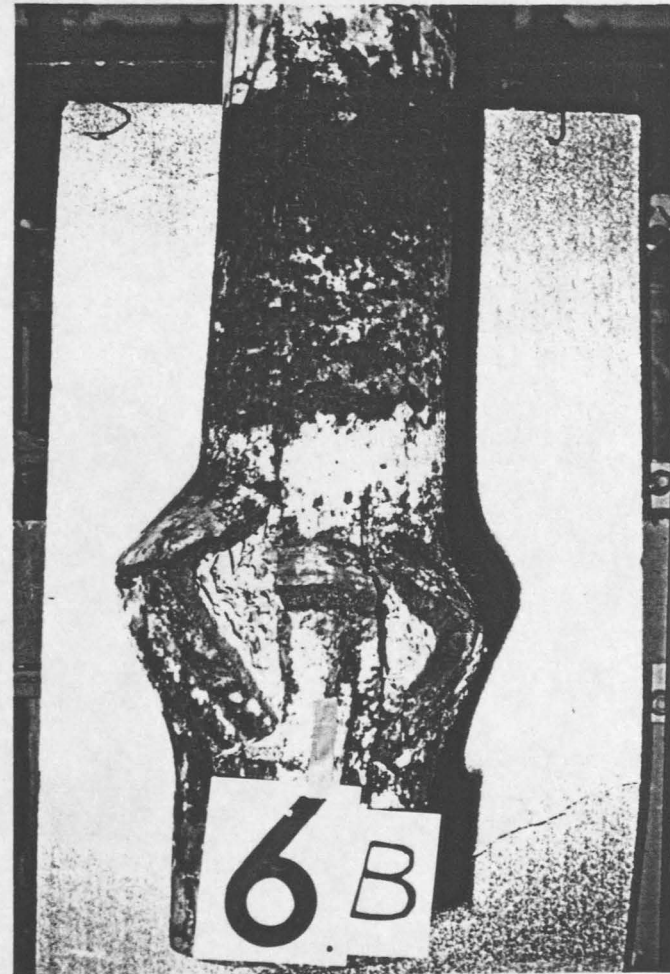
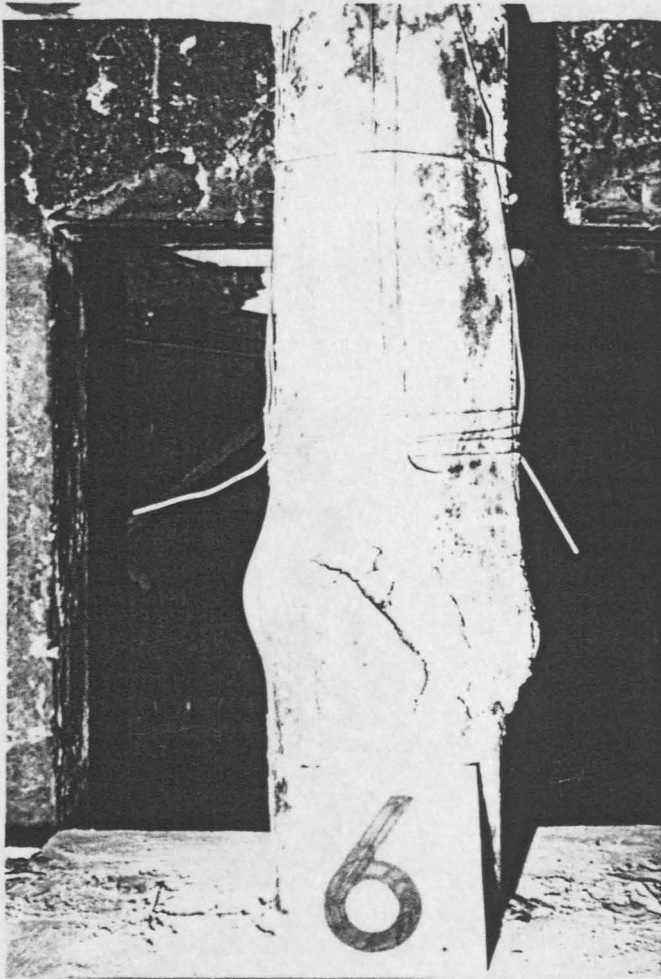


Foto 11 und 12: Gußstummel 6 und 6B nach dem Brandversuch

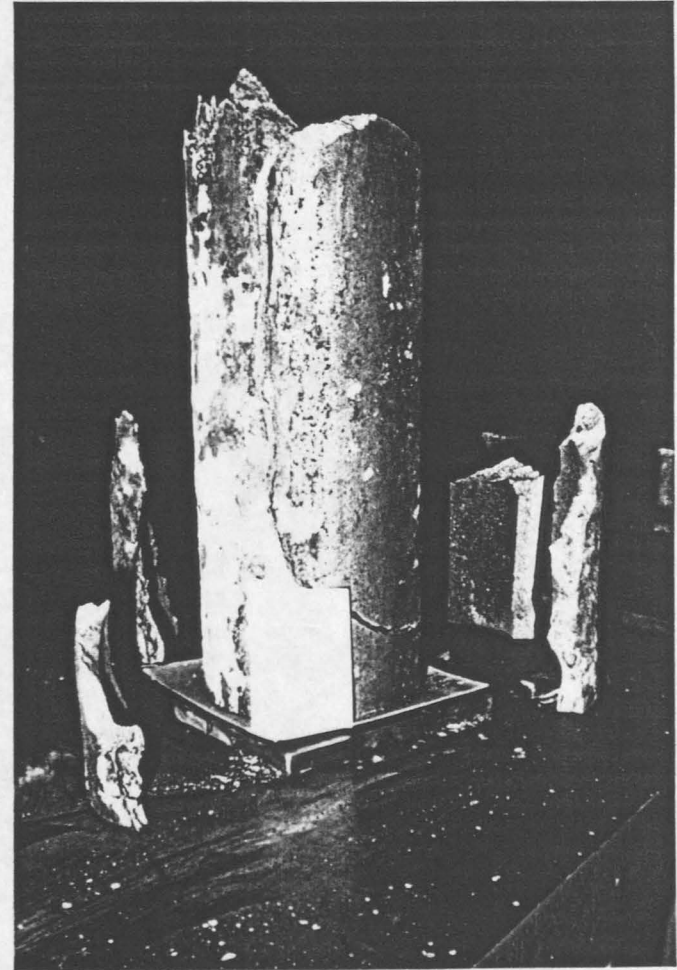
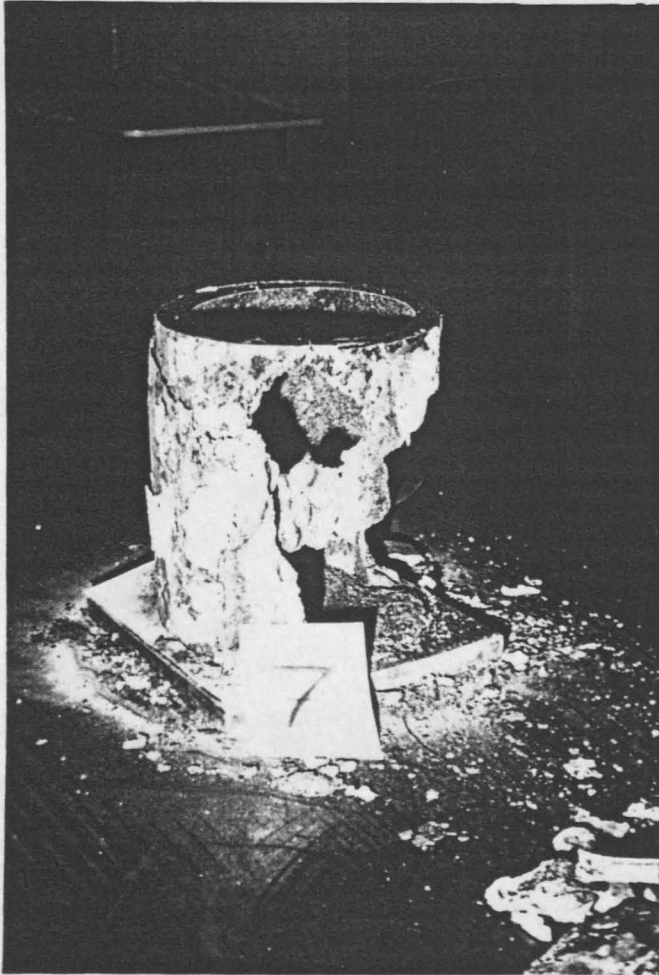


Foto 13 und 14: Zwei Gußstummel nach dem "Kaltversuch"  
(beide Versuchskörper wurden aus Gußstummel 7 hergestellt)





Foto 15: Gußstummel 7B nach dem Brand-  
versuch

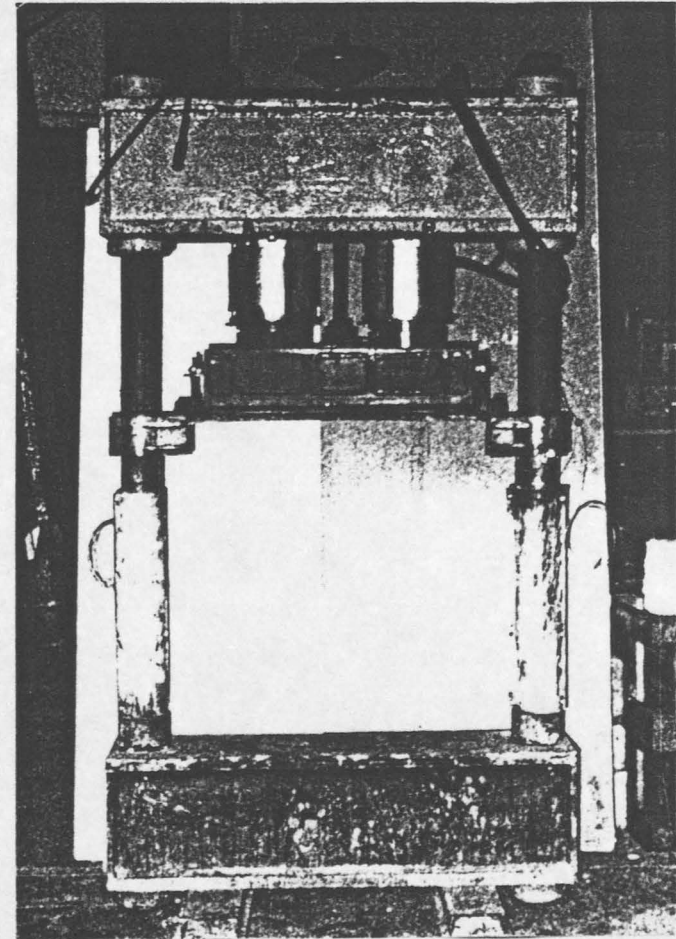
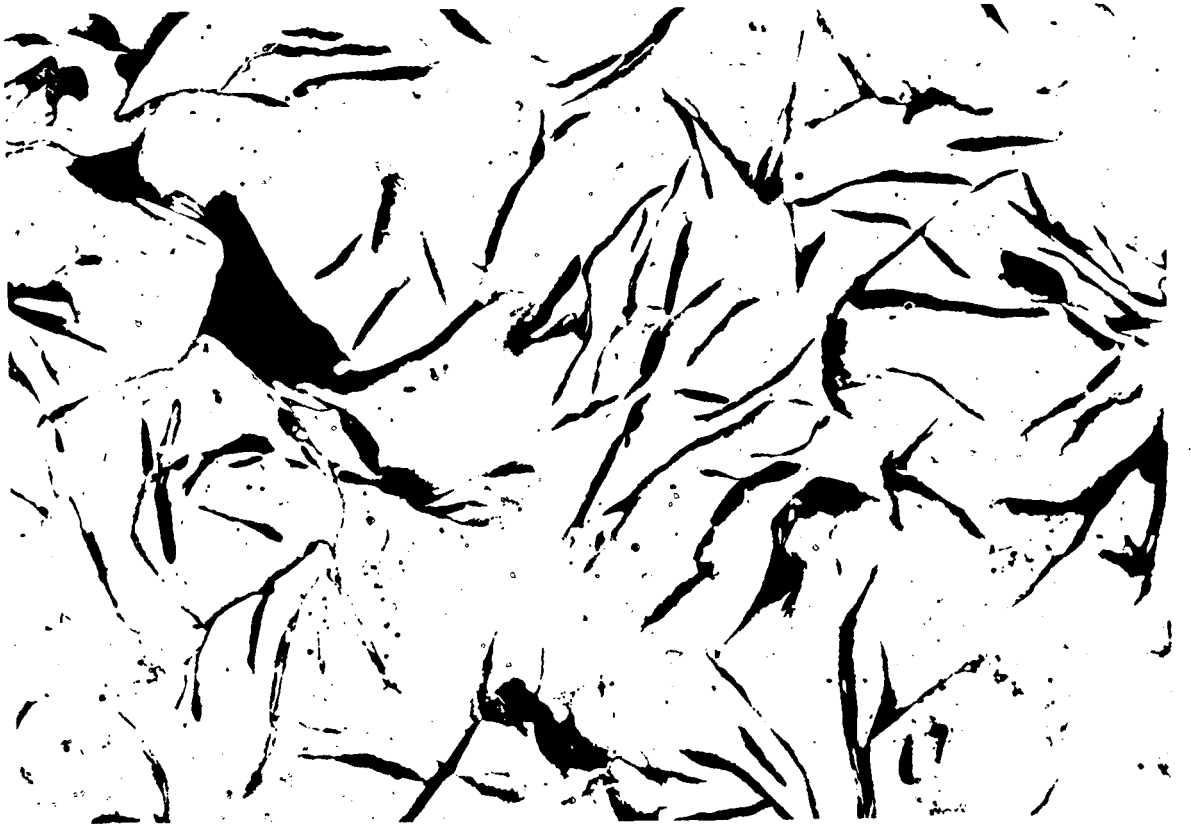
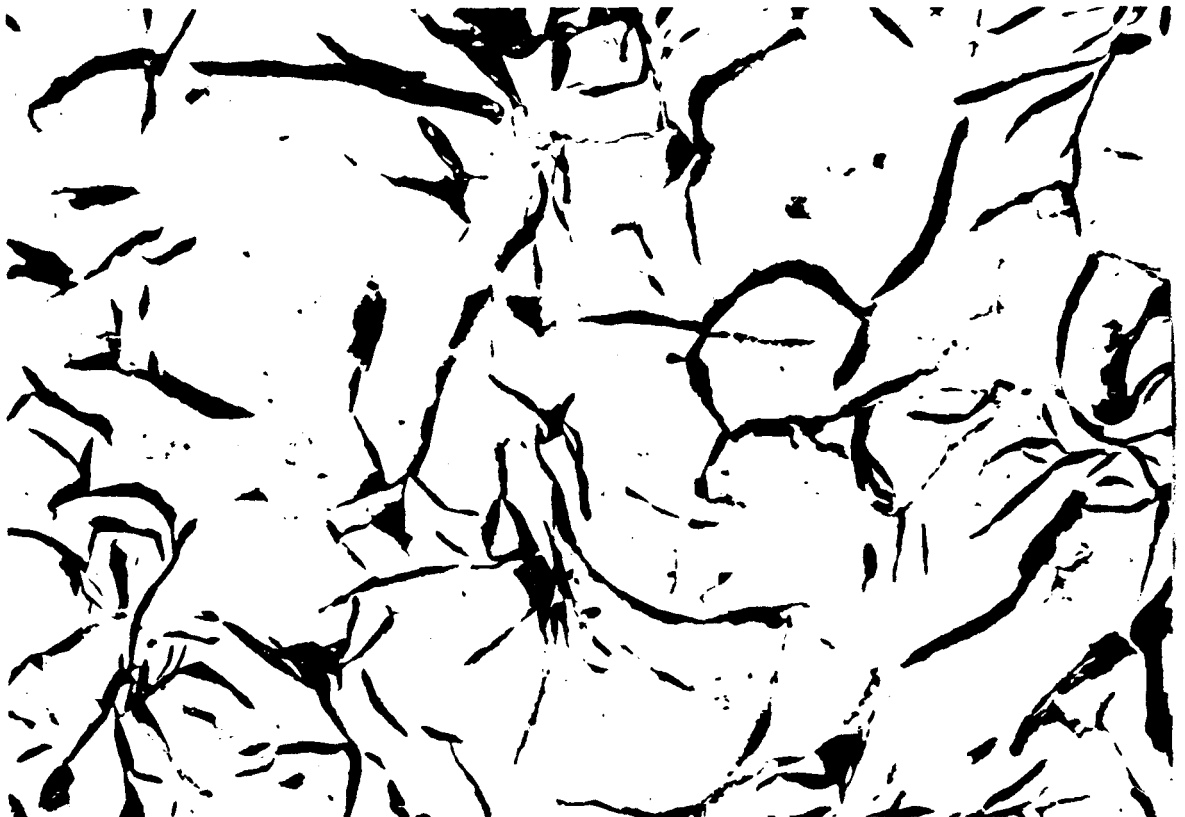


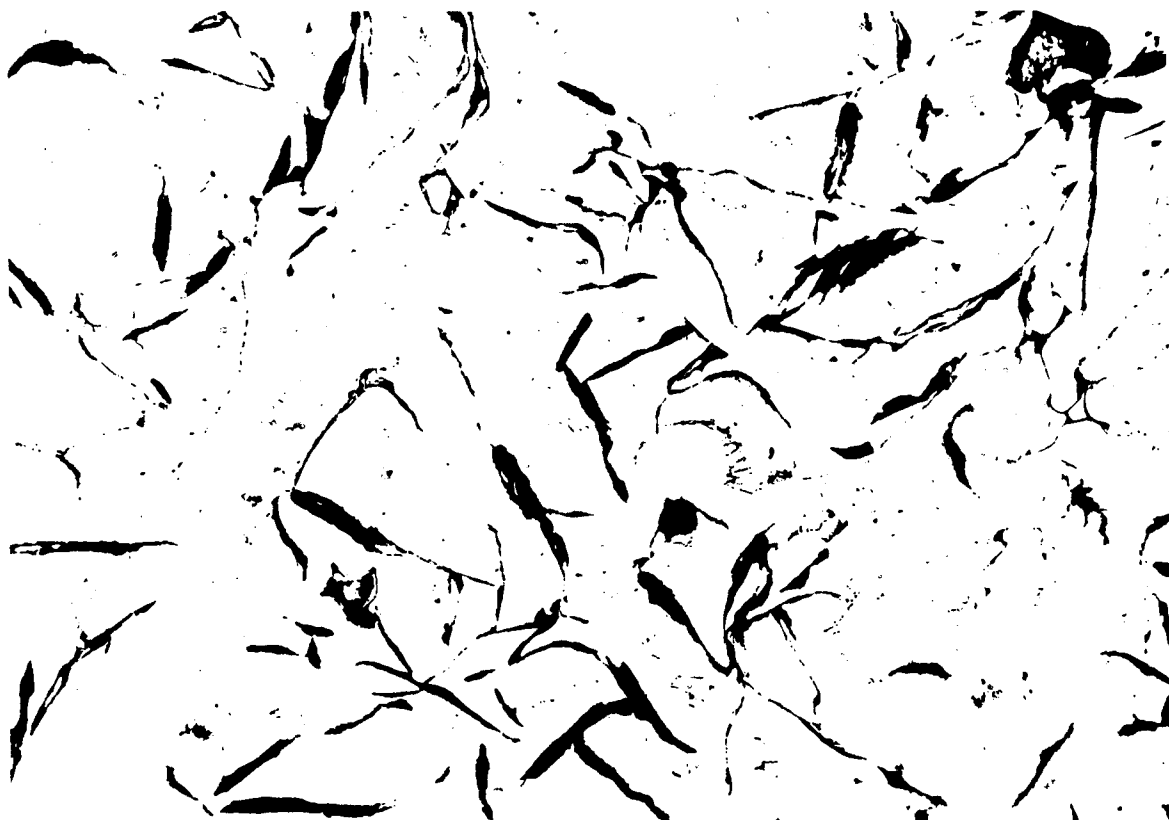
Foto 16: Belastungsgerüst des Kleinbrand-  
hauses



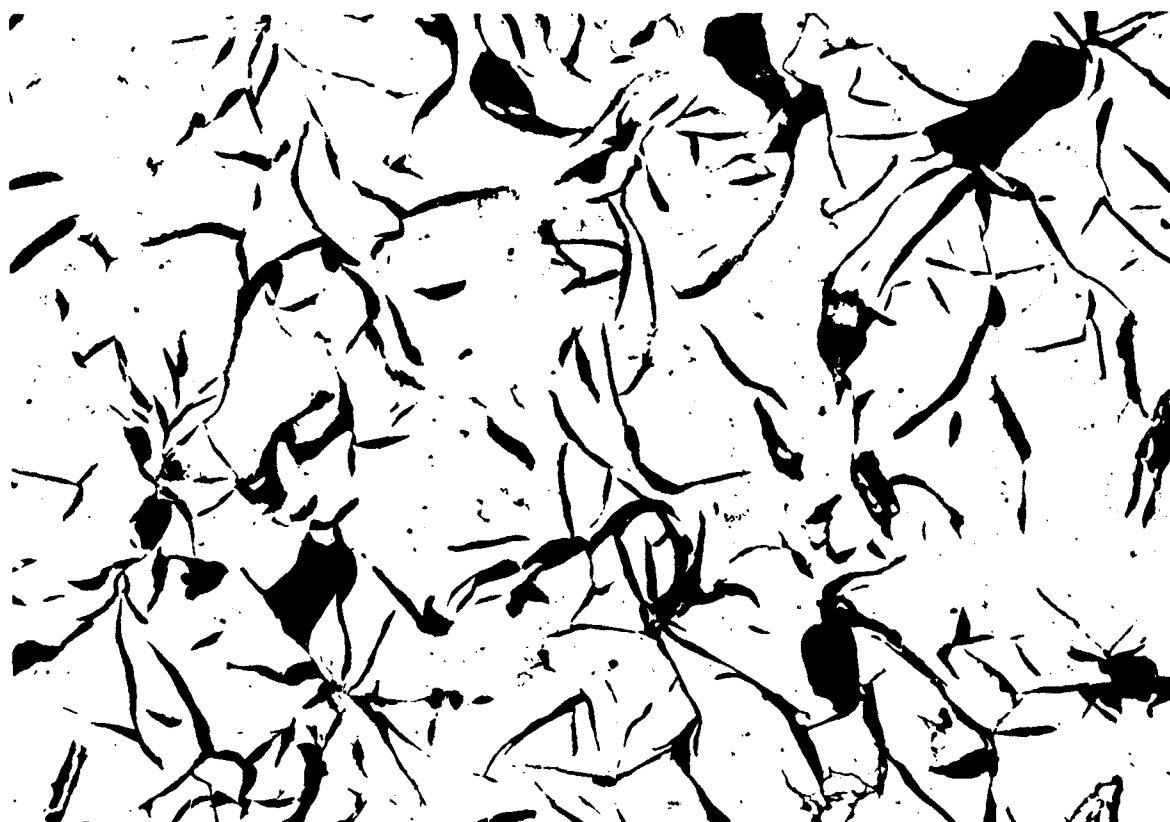
**Foto 17:** Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 1,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3



**Foto 18:** Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 2,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3



**Foto 19:** Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 3,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3



**Foto 20:** Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 4,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3



Foto 21: Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 5,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3



Foto 22: Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 6,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3



**Foto 23:** Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 7,  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung C, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 3 (4)



**Foto 24:** Mikroschliff (ungeätzt) von Probe 1 (Probenrand),  $V = 100 : 1$ ,  
Lamellengraphitanordnung B, Lamellengraphitlänge: Richtzahl 4 (5)





Foto 25: Mikroschliff von Probe 1, geätzt mit Nital,  $V = 100 : 1$



Foto 26: Mikroschliff von Probe 5, geätzt mit Nital,  $V = 100 : 1$



Foto 27: Mikroschliff von Probe 5, äußerer Rand, V = 100 : 1

---

# BAUFORSCHUNG

DER MINISTER FÜR LANDES- UND STADTENTWICKLUNG  
DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

## Kurzfassung des Abschlußberichtes.

**Forschungsthema:** Tragverhalten von gußeisernen Stützen unter Brandbeanspruchung

**Forschende Stelle:** Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Beethovenstr. 52, 3300 Braunschweig

**Datum der Vergabe:** 17. April 1985

### 1. Ziel der Untersuchung.

Seit einiger Zeit wird im Rahmen der Denkmalpflege und der Aktivierung vorhandener Bausubstanz die Frage nach der brandschutztechnischen Beurteilung von gußeisernen Bauteilen (Träger und Stützen) gestellt.

Angaben über das Brandverhalten solcher Stützen sind in der entsprechenden Brandschutznorm, der DIN 4102 Teil 4, nicht enthalten. Fehlende Erfahrungen aus Brandversuchen an solchen Bauteilen und nur lückenhafte Informationen über das Materialverhalten von Grauguß unter Brandbeanspruchung führten zwangsläufig zu vorsichtiger, oftmals weit auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung der Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Stützen.

Da Grauguß etwa das gleiche ungünstige Erwärmungsverhalten wie Stahl zeigt, stellt sich gleichzeitig die Frage, mit welchen Maßnahmen die Feuerwiderstandsfähigkeit von gußeisernen Hohlprofilen verbessert werden kann.

Eine Prüfung nach DIN 4102 Teil 2 ist bei gußeisernen Hohlensäulen nicht möglich, da es sich bei den zur Beurteilung anstehenden Stützen in der Regel um vorhandene alte Bausubstanz und nicht um eine neue Baumaßnahme handelt. Das Temperaturkriterium von 500 °C bei Stahlstützen kann für gußeiserne Hohlensäulen wegen der unterschiedlichen Materialeigenschaften und der deutlich geringeren zulässigen Gebrauchslasten nicht übernommen werden.

Für gußeiserne Hohlensäulen sind deshalb gesicherte brandschutztechnische Beurteilungskriterien erforderlich, die eine Prüfung nach DIN 4102 Teil 2 überflüssig machen.

## 2. Ergebnis der Untersuchung

Gußstützen versagen infolge ihrer geringen Auslastung und ihrer geringen wirksamen Schlankheit  $\lambda$  im Brandfall erst bei Verlust ihrer Querschnittstragfähigkeit. Die Versagenstemperatur (krit T) von gußeisernen Hohlprofilen kann daher in Abhängigkeit von der vorh. Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  oder der zul. Querschnittsbeanspruchung n. DIN 1051 definiert werden. Bei zul. Gebrauchslast gem. dieser Norm kann krit T für zul  $\lambda \leq 100$  mit 725 °C angegeben werden. Bei davon abweichenden Stützenlasten kann krit T mit Hilfe der Bilder 31 u. 32 modifiziert werden. In einer Parameterstudie wurden die Gußtemperaturen in der 30. bzw. 60. Min. für baupraktisch relevante Profilbeiwerte U/A ermittelt. Damit ist eine realistische Abschätzung der Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Hohlstützen und ihre Zuordnung in eine Feuerwiderstandsklasse möglich. So sind für gußeiserne Hohlprofile mit einer zul. Gebrauchslast gem. DIN 1051 und einem  $U/A \leq 45 \text{ m}^{-1}$  keine Brandschutzmaßnahmen zur Einordnung in die Feuerwiderstandsklasse "F 30" erforderlich (Bild 33). Das Verfüllen mit einem hochwertigen Beton ( $\geq B 35$ ) bewirkt eine langsamere Erwärmung des Gußprofils. Außerdem übernimmt der Beton nach dem Einsetzen plastischer Stauchungen des Gußprofils einen Teil der Auflast und entlastet somit das Gußprofil. Betonverfüllte gußeiserne Hohlprofile können ohne Beschränkung der Feuerwiderstandsklasse "F 30" zugeordnet werden. Nach STANKE wurde bei mit einem dämmschichtbildenden Anstrich versehenen Stahlrohren mit einem vergleichsweise hohen  $U/A = 105 \text{ m}^{-1}$  krit T = 500 °C nach 30 min knapp überschritten. Bei dem wesentlich höheren krit T gußeiserner Hohlprofile können mit solchen Anstrichen versehene Gußstützen uneingeschränkt der Feuerwiderstandsklasse "F 30" zugeordnet werden. Eine Zuordnung in die Feuerwiderstandsklasse "F 60" ist dagegen auch bei betonverfüllten Hohlprofilen nur für ein  $U/A \leq 23 \text{ m}^{-1}$  möglich (Bild 22). Ein "F 30"-Anstrich, der in Verbindung mit einer Betonfüllung die Gußtemperaturen bis zur 30. Min. deutlich unter 500 °C halten würde, stellt nur für relativ kleine Profilbeiwerte eine mögliche Lösung dar.

### **3. Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen.**

#### **3.1 Welche Empfehlungen können für die weitere Normungsarbeit bzw. hinsichtlich Ergänzung oder Änderung bestehender Normen, Richtlinien und dgl. gegeben werden ?**

Zur Zeit fehlt in DIN 4102 jeglicher Hinweis auf die Feuerwiderstandsdauer bzw. die kritische Temperatur von gußeisernen Bauteilen.

Für gußeiserne Hohlprofilstützen könnte entsprechend der kritischen Temperatur von 500 °C für Stahlbauteile unter Gebrauchslast eine kritische Temperatur von 725 °C angegeben werden. Bei Stützenlasten, die von den Gebrauchslasten gemäß DIN 1051 (Febr. 1937) abweichen, könnten aus Bild 31 oder Bild 32 modifizierte kritische Temperaturen entnommen werden.

Die zugehörige Feuerwiderstandsdauer wäre für praxisrelevante Profilbeiwerte Bild 33 zu entnehmen. Der günstige Einfluß einer Betonfüllung und/oder eines "F 30"-Anstriches könnte ebenfalls aus Bild 33 entnommen werden.

#### **3.2 Erscheinen weitere Arbeiten zur Abklärung offengebliebener Fragen, die mit den durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang stehen, erforderlich und welche Arbeiten sind besonders vorrangig ?**

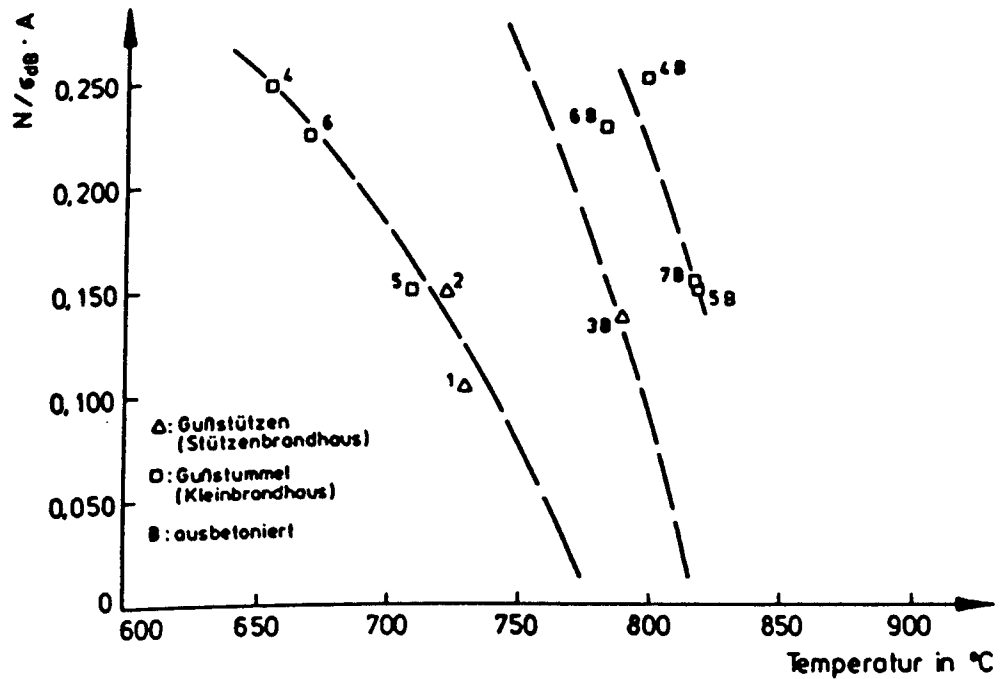
Wegen der Begrenztheit des verwendbaren Abbruchmaterials konnten nur Brandversuche mit Lasten, die größer/gleich den zulässigen Gebrauchslasten gemäß DIN 1051 waren, durchgeführt werden. Die kritischen Temperaturen von Gußhohlprofilstützen mit niedrigeren Lasten wurden daher auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt.

Verbesserte dämmschichtbildende Anstriche könnten sicherlich mit oder auch ohne gleichzeitige Betonfüllung die Feuerwiderstandsdauer gußeiserner Hohlprofile deutlich erhöhen.

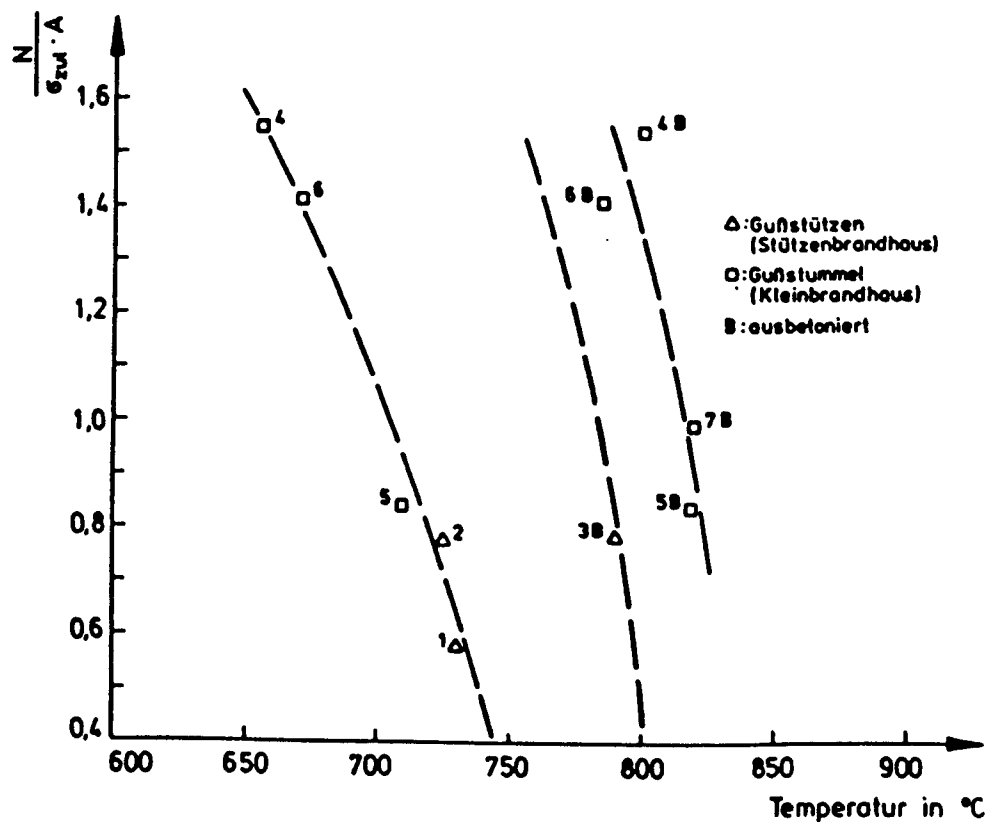
Zur Klärung dieser Fragen sind lediglich Brandversuche an einigen Gußstummeln erforderlich.

#### **3.3 Welche Folgerungen können für die Baupraxis aus den Untersuchungsergebnissen gezogen werden; hierbei ist auf bestehende Richtlinien besonders Rücksicht zu nehmen ?**

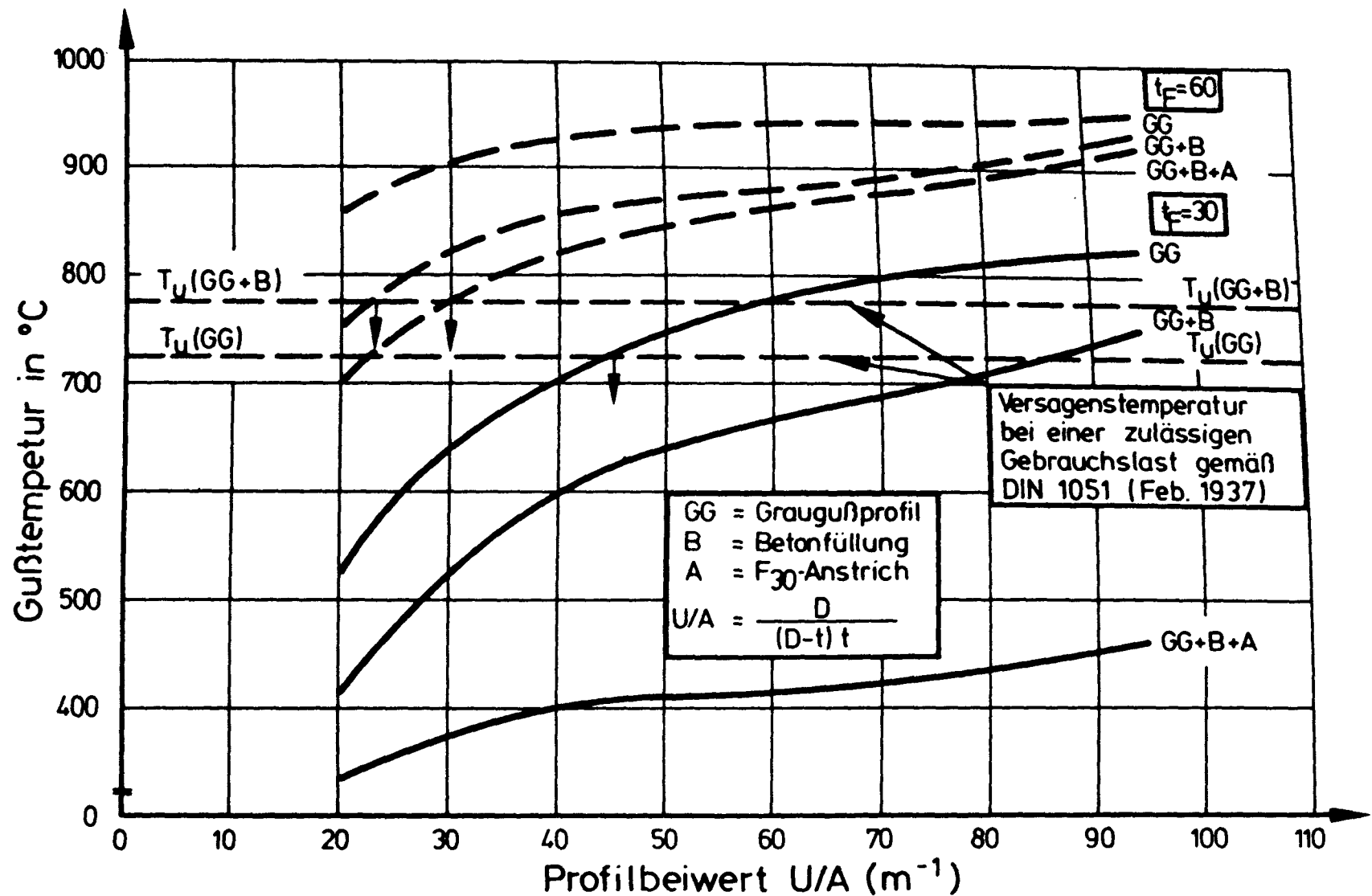
Alle in DIN 4102 bzw. in Prüfzeugnissen vorgenommenen Bewertungen von dämmschichtbildenden Anstrichen oder Brandschutzbekleidungen basieren auf dem für Stahlbauteile gültigen Temperaturkriterium von  $\text{crit } T = 500 \text{ °C}$ . Da die kritische Temperatur von gußeisernen Hohlprofilstützen mit 725 °C wesentlich über diesem Wert liegt, sind die Angaben über erforderliche Bekleidungsicken zur Einordnung in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse nicht auf gußeiserne Hohlprofilstützen anwendbar; sie liegen viel zu weit auf der sicheren Seite und führen zu unwirtschaftlichen Lösungen.



**Bild 31:** Versagenstemperaturen in Abhängigkeit von der auf die rechnerische Quetschlast bezogenen Versuchslast



**Bild 32:** Versagenstemperaturen in Abhängigkeit von der auf die zulässige Querschnittsbeanspruchung (DIN 1051) bezogenen Versuchslast



**Bild 33:** Oberflächentemperaturen von Gußhohlprofilen in Abhängigkeit vom Profilwert  $U/A$  für verschiedene Brandschutzmaßnahmen